

На правах рукописи



Кучинский Михаил Олегович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ
ПУЗЫРЬКОВ В ЖИДКОСТИ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ
ВОЗДЕЙСТВИИ**

Специальность 1.1.9 —
«Механика жидкости, газа и плазмы»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Пермь — 2025

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

Научный руководитель: **Любимова Татьяна Петровна**,
доктор физико-математических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Гималтдинов Ильяс Кадирович**,
доктор физико-математических наук (01.02.05),
член-корреспондент АН РБ,
профессор, заведующий кафедры физики ФГБОУ
ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (г. Уфа),

Карпунин Иван Эдуардович,
кандидат физико-математических наук (01.02.05),
доцент кафедры физики и технологии ФГБОУ
ВО «Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет» (г. Пермь).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем машиноведения Российской академии наук», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится **11 февраля 2026 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: 614018, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87; сайт: www.icmm.ru.

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

Автореферат разослан «___» декабря 2025 г.

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



Зуев А. Л.

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Изучение поведения жидкостей с пузырьками под действием ультразвука имеет важное значение для понимания и оптимизации процессов в химической, горнодобывающей и пищевой промышленности. Использование ультразвукового воздействия — перспективный метод повышения эффективности флотационного обогащения, особенно для мелкодисперсных частиц, где традиционные методы демонстрируют недостаточную эффективность.

Несмотря на то, что влияние ультразвука на жидкость активно изучается с середины XX века, многие аспекты, такие как динамика пузырьков вблизи поверхностей с разной смачиваемостью и влияние добавок (солей, ПАВ) на кавитацию, остаются недостаточно исследованными. Теоретические модели предсказывают повышение эффективности флотационных процессов за счет ультразвуковой обработки, однако экспериментальные данные показывают сложную зависимость ультразвуковых эффектов от частоты и мощности источников ультразвука и состава жидкости.

Экспериментальные и теоретические исследования кавитации при ультразвуковом воздействии имеют длительную историю и проводились научными коллективами в различных странах. Исследовались различные аспекты: образование и схлопывание кавитационных пузырьков, их взаимодействие между собой. Разрабатывались методики визуализации кавитационных процессов, а также модели для прогнозирования поведения пузырьков в сложных средах. Вопросам определения зон активной кавитации при ультразвуковом воздействии посвящена первая глава настоящей работы.

В связи с технологическими приложениями большой интерес представляют изучение механизмов взаимодействия пузырьков с твердыми поверхностями и между собой, при действии ультразвука. Современные исследования сосредоточены на анализе изменений характеристик поверхности и их влиянии на динамику пузырьков, что имеет важное значение для практической реализации. Так, ультразвуковое воздействие активно применяется в производстве нанокомпозитов, при этом механизм такого воздействия на твердые поверхности до сих пор изучен недостаточно. Это обуславливает актуальность исследования взаимодействия пузырьков с твердыми поверхностями различной гидрофобности, которому посвящена вторая глава настоящей работы.

Применение ультразвукового воздействия является перспективным направлением повышения эффективности флотации, особенно для обогащения мелкодисперсных руд, где традиционные методы демонстрируют ограниченную результивность. Ультразвук оказывает комплексное воздействие на ключевые стадии флотационного процесса: взаимодействие флотационных пузырьков, генерируемых аэрационными системами, с частицами руды в жидкой среде; закрепление гидрофобизированных частиц на пузырьках; и их последующее

всплытие. Важнейшим фактором управления этими процессами является контроль размеров и количества пузырьков. Исследованию особенностей генерации пузырьков флотационного размера посвящена третья глава.

Важную роль в разделении руд методом флотации играют поверхностно-активные вещества и реагенты, обеспечивающие избирательную гидрофобизацию ценных компонентов руды, что обуславливает необходимость изучения влияния ультразвука на водные растворы, содержащие эти добавки. Для применения ультразвуковой обработки при обогащении калийных руд важно также изучить влияние ультразвука на водные растворы солей NaCl и KCl . Понимание механизмов воздействия ультразвука на флотационную систему с учетом введения химических добавок имеет принципиальное значение для оптимизации технологических процессов и повышения эффективности разделения минеральных компонентов.

Целью диссертационной работы является определение закономерностей процессов, возникающих в жидкостях с пузырьками при ультразвуковом воздействии.

Для достижения цели в ходе выполнения работы необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработка метода регистрации, позволяющего получить данные о пространственном распределении и временной эволюции активности кавитационных событий в сонохимическом реакторе с использованием тепловых карт.
2. Исследование влияния концентрации соли NaCl и ПАВ SDS (додецилсульфата натрия) на кавитационную активность.
3. Изучение динамики пузырьков вблизи и на твердых поверхностях с различной степенью смачиваемости при ультразвуковом воздействии.
4. Исследование влияния ультразвука на генерацию воздушных пузырьков флотационного размера в воде и водных растворах солей и ПАВ с помощью кварцевой ультрафильтрационной мембрany.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней:

- Разработан новый метод регистрации кавитационной активности, обеспечивающий пространственно-временной анализ активности кавитационных процессов в объеме сонохимического реактора.
- Обнаружена корреляция между полями кавитационной активности и акустического давления, позволяющая использовать данные о распределении активности кавитации для нахождения распределения звукового давления.
- Найдено, что увеличение концентрации NaCl в воде приводит к подавлению кавитационной активности за счет повышения поверхностного натяжения и вязкости раствора, что затрудняет образование и рост кавитационных пузырьков.

- Обнаружено, что под действием ультразвука поверхность пузырька, закрепившегося на гидрофобной твердой поверхности, совершает колебания с частотой, близкой к частоте второй моды собственных колебаний формы сферического пузырька.
- Показано, что в результате воздействия ультразвука статический контактный угол уменьшается за счет изменения свойств поверхности, а после прекращения обработки остается неизменным в течение длительного времени.
- Показано, что ультразвуковая обработка водных растворов NaCl приводит к увеличению среднего размера пузырьков, генерируемых мембранным методом, по сравнению с чистой водой.
- Зафиксирован и количественно охарактеризован эффект совместного влияния добавления NaCl и SDS в ультразвуковом поле, проявляющийся в сохранении распределения пузырьков по размеру, характерного для чистой воды, при десятикратном увеличении количества генерируемых пузырьков.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Разработанный на основе теста фольгой и визуализации с использованием тепловых карт метод регистрации кавитационной активности обеспечивает возможность пространственно-временного анализа кавитационных процессов в объеме сонохимического реактора.
- Обнаруженная корреляция между кавитационной активностью и акустическим давлением позволяет использовать карты кавитационной активности в качестве индикаторов звукового поля в жидкостях.
- Добавление соли NaCl приводит к уменьшению кавитационной активности вследствие роста поверхностного натяжения и вязкости раствора, тогда как добавка SDS вызывает уменьшение активность кавитации, обусловленное генерацией множества кавитационных зародышей при общем снижении поверхностного натяжения.
- При воздействии ультразвука, возникают колебания поверхности пузырька, закрепившегося на гидрофобной твердой поверхности, с частотой, близкой к частоте второй моды собственных колебаний формы для сферического пузырька.
- Ультразвуковая обработка приводит к уменьшению статического контактного угла за счет изменения свойств поверхности; после прекращения ультразвукового воздействия установившееся к концу обработки значение угла остается неизменным в течение длительного времени.
- Ультразвуковая обработка водных растворов NaCl вызывает увеличение среднего размера флотационных пузырьков, генерируемых с помощью мембранны, по сравнению с чистой водой. Для водных растворов, содержащих одновременно NaCl (0.3 моль/л) и SDS (3 ммоль/л), наблюдается

эффект, проявляющийся в сохранении гистограммы распределения пузырьков по размеру, характерному для чистой воды, при одновременном увеличении на порядок количества пузырьков в объеме жидкости.

Практическая значимость Результаты, полученные в рамках диссертационной работы, углубляют понимание механизмов ультразвукового воздействия на жидкости с пузырьками.

Метод, предложенный в первой главе диссертации, может быть использован для пространственно-временного анализа активности кавитационных процессов в светопроницаемых жидкостях.

Результаты, изложенные во второй главе, могут быть применены при анализе процессов закрепления пузырьков на твердых поверхностях и изменения смачиваемости поверхностей под действием ультразвука.

Материалы третьей главы дают представление о закономерностях генерации пузырьков в водных растворах соли NaCl и ПАВ SDS. Установленные зависимости влияния ультразвука на параметры генерируемых газовых включений подтверждают возможность управления их размерами и концентрацией.

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы в различных технологических приложениях, включая процессы флотационного обогащения полезных ископаемых.

Методология и методы исследования. Основу исследования составил физический эксперимент. Все измерения проводились с использованием высокоточных методов и современного измерительного оборудования, обеспечивающих высокую чувствительность и надёжность измерений, а также воспроизводимость получаемых данных.

Экспериментальная установка и условия проведения опытов. Все эксперименты проводились с использованием сонохимического реактора в форме прямоугольного параллелепипеда, оснащённого ультразвуковым излучателем с частотой 28 кГц, расположенным в его нижней части. В качестве рабочей среды использовались дистиллированная вода, водные растворы соли NaCl и ПАВ SDS разной концентрации.

Методы анализа кавитационной активности. Для исследования кавитационной активности был применен разработанный в рамках работы модифицированный метод теста фольгой, позволяющий получать данные о пространственно-временной эволюции кавитационной активности в реакторе. В качестве индикатора использовалась алюминиевая фольга толщиной 10 мкм, закрепленная на вертикальной рамке. Пространственное распределение кавитационных повреждений фиксировалось цифровой камерой с контролевым освещением через равные временные интервалы.

Полученные изображения обрабатывались с помощью специализированного программного обеспечения на Python, включающего цифровую обработку изображений. Программа фиксировала момент времени, площадь и расположение зон разрушения фольги, что дало возможность получить количественные

данные о пространственно-временном распределении кавитационной активности.

Для исследования динамики пузырьков на твердых поверхностях использовалась экспериментальная установка с кварцевым капилляром диаметром 0.3 мм для генерации пузырьков и тремя типами твердых пластин разной степени смачивания, закрепленных горизонтально в жидкости: гидрофильным кварцем, акрилом и гидрофобным тефлоном. Процесс взаимодействия регистрировался высокоскоростной камерой и камерой с телесцентрическим объективом. Последующая обработка позволяла анализировать характеристики формы: контактный диаметр, краевой угол, высоту пузырьков.

Генерация и анализ пузырьков флотационного размера. Пузырьки флотационного размера формировались с помощью кварцевой ультрафильтрационной мембранны (диаметр пор 0.9 – 1.4 мкм) при подаче воздушного потока с расходом 1 л/мин. Распределение пузырьков по размеру определялось методами компьютерной обработки изображений. Результаты визуализировались в виде каскадных диаграмм распределения и графиков зависимости концентрации пузырьков от состава раствора.

Достоверность обеспечивается физической обоснованностью постановки эксперимента, применением современной измерительной аппаратуры, апробированных экспериментальных методик. Полученные результаты согласуются с литературными данными, теоретическими и экспериментальными результатами других исследователей.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на межвузовской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Физика для Пермского края» (Пермь, 2017); Всероссийской конференции с международным участием «Пермские гидродинамические научные чтения» (Пермь, 2018, 2020, 2022); Russian Conference on Magneto Hydrodynamics (Perm, 2021); International Symposium «Non-equilibrium processes in continuous media» (Perm, 2021); 13-й международной конференции-школы молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах» (Москва, 2023); XIII Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Санкт-Петербург, 2023) Зимней школе по механике сплошных сред (Пермь, 2021, 2023, 2025); Пермском гидродинамическом семинаре (Пермь, 2023, 2024); Всероссийской конференции молодых ученых-механиков (Сочи, 2021, 2023, 2024); International congress of theoretical and applied mechanics ICTAM2024 (Korea, 2024); Всероссийском семинаре «Физико-химия поверхностей и наноразмерных систем» (Москва, 2025), на IX Российской конференции – школе молодых ученых с международным участием «Многофазные системы: модели, эксперимент, приложения» (Уфа, 2025).

Исследования, результаты которых вошли в диссертацию, проводились при поддержке грантов РНФ (20-69-46066, <https://rscf.ru/project/20-69-46066/> и 24-11-00269, <https://rscf.ru/project/24-11-00269/>), и крупного научного проекта

при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

Личный вклад. Автор самостоятельно разрабатывал конструкции и изготавливал экспериментальные установки, проводил измерения и последующую обработку данных. Выступал на научных конференциях с докладами по теме диссертационной работы. Постановка задач, обсуждение и интерпретация результатов осуществлялись совместно с научным руководителем и соавторами.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 8 печатных изданиях, 8 из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, из них 7 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

Содержание работы

Во введении приведены актуальность и практическая значимость работы, сформулированы цель, задачи, научная новизна и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена методам исследования акустических полей и регистрации кавитационных событий. Представлен обзор современных исследований в этой области, включающий анализ экспериментальных методик, их преимуществ и ограничений [1—3]. Представлена конструкция экспериментальной установки (Рис. 1а) и приведены результаты исследования кавитационной активности в сонохимическом реакторе при ультразвуковом воздействии. Описывается разработанный в рамках диссертационной работы метод регистрации, который обеспечивает визуализацию пространственного распределения кавитационных событий (Рис. 1б) и позволяет отслеживать их временную динамику с использованием тепловых карт.

Экспериментальные исследования проводились с использованием сонохимического реактора, представляющего собой кювету в форме прямоугольного параллелепипеда с закрепленным в нижней части ультразвуковым излучателем частотой 28 кГц (Рис. 1б). Для регистрации кавитационной активности использовалась алюминиевая фольга толщиной 10 $\mu\text{м}$, натянутая на вертикальную рамку, разрушение фольги являлось индикатором кавитационной активности. Регистрация областей разрушения производилась с помощью цифровой камеры; полученные данные обрабатывались с помощью программы обработки изображений, написанной на Python.

Разработанный метод позволил решить три задачи: проанализировать пространственно-временное распределение кавитационной активности в дистиллированной воде, исследовать влияние добавок соли NaCl и ПАВ SDS различной концентрации на кавитационные процессы, включая скорость образования и расположение кавитационных зон, а также сопоставить экспериментальные данные о распределении кавитационной активности с результатами

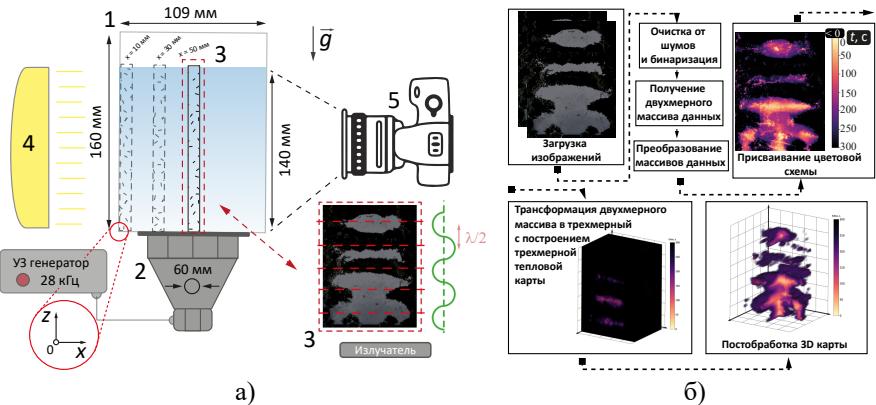


Рис. 1 — а) Принципиальная схема экспериментальной установки: 1) кювета; 2) 28 кГц - источник ультразвука; 3) рамка с фольгой; 4) источник контролевого света; 5) камера Nikon d7200; б) Схема программы для обработки экспериментальных данных: преобразование двумерной тепловой карты повреждений фольги в трёхмерное представление пространственно-временной динамики кавитационных событий

численного моделирования поля акустического давления вsonoхимическом реакторе.

Анализ тепловых карт продемонстрировал существенные изменения в характере кавитационной активности при добавлении в воду соли NaCl и ПАВ SDS. В случае растворов NaCl наблюдается смещение зон максимального разрушения от центра к верхней части кюветы и общее снижение площади зон повреждений с ростом концентрации соли (Рис. 2, 3а). Такое поведение связано с изменением физико-химических свойств жидкости: увеличение поверхностного натяжения и вязкости раствора приводит к повышению порога акустической кавитации, а ионы Na^+ и Cl^- выступают дополнительными центрами нуклеации, способствуя образованию множества мелких пузырьков вместо относительно крупных кавитационных полостей. При этом выделяемая при схлопывании пузырьков энергия рассеивается в объеме жидкости, что и объясняет уменьшение площади разрушений фольги [4].

Добавление SDS, как и в случае с солью, приводит к снижению кавитационной активности по сравнению с водой (Рис. 3б), однако наблюдается принципиальное отличие: зоны максимальной кавитационной активности смещаются к боковым стенкам реактора. Такое перераспределение кавитационных событий обусловлено комплексным действием ПАВ: снижение поверхностного натяжения облегчает образование пузырьков, а адсорбция молекул SDS на границах раздела фаз стабилизирует микропузырьки, которые концентрируются преимущественно у твердых поверхностей.

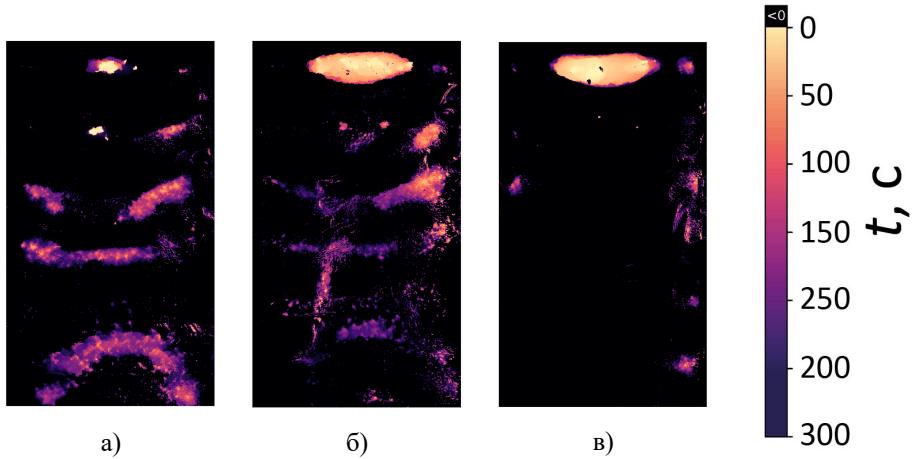


Рис. 2 — Термовые карты, иллюстрирующие зоны кавитационной активности в растворах, для различных концентраций соли: а) $C_0 = H_2O$; б) $C_1 = 0.6$ моль/л $NaCl$; в) $C_1 = 1.0$ моль/л $NaCl$

Сопоставление экспериментальных данных о распределении кавитационной активности с результатами численного моделирования поля акустического давления вsonoхимическом реакторе, проведенного И.О. Сбоевым [5], выявило корреляцию между зонами кавитационной активности и областями с повышенными значениями акустического давления (Рис. 5). Это свидетельствует о том,

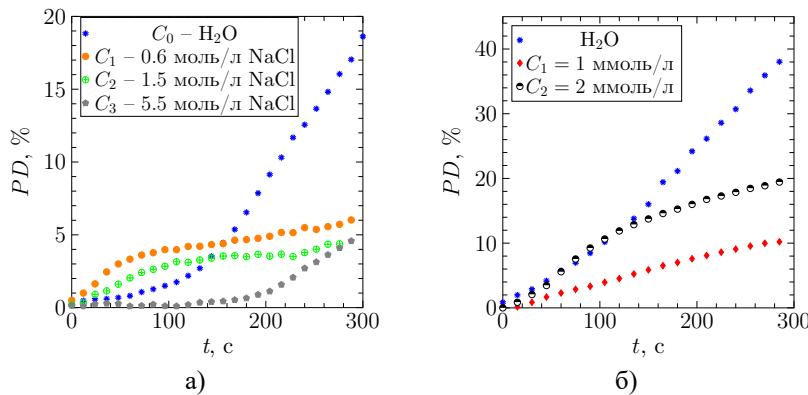


Рис. 3 — Временная динамика относительной площади разрушений поверхности фольги ($PD(\%) = S_d/S_i \cdot 100\%$, где S_d - площадь поврежденной поверхности, а S_i - полная площадь фольги до ультразвукового воздействия) для: а) растворов соли $NaCl$: $C_0 = H_2O$; $C_1 = 0.6$ моль/л $NaCl$; $C_1 = 1.0$ моль/л $NaCl$; $C_2 = 1.5$ моль/л $NaCl$; б) растворов SDS : $C_1 = 1$ ммоль/л; $C_2 = 2$ ммоль/л

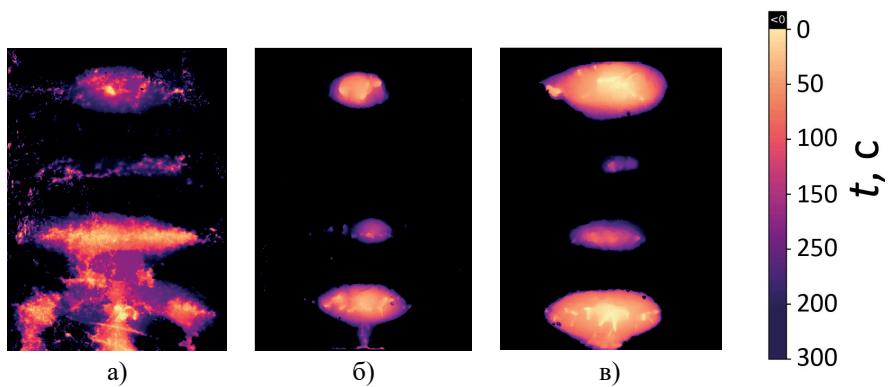


Рис. 4 — Термальные карты, иллюстрирующие зоны кавитационной активности в растворах, для различных концентраций ПАВ: а) $C_0 = H_2O$; б) $C_1 = 0.6$ ммоль/л SDS; в) $C_1 = 1.0$ ммоль/л SDS

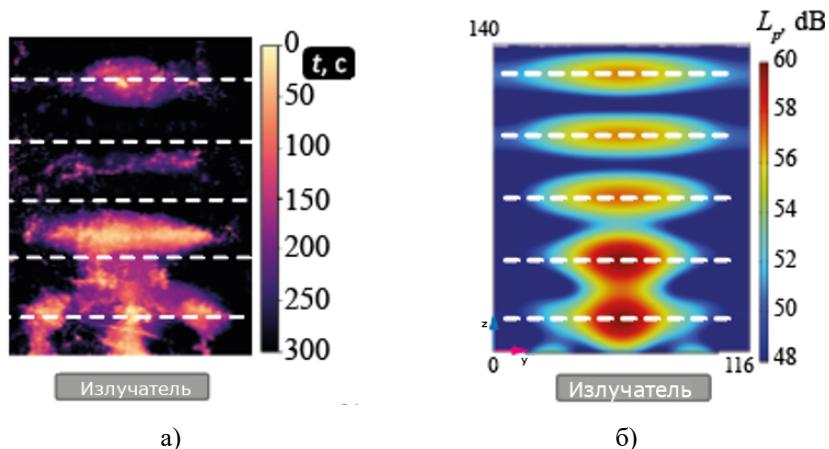


Рис. 5 — а) Полученное в экспериментах с водой без примесей распределение зон кавитационной активности; б) Результат численного моделирования распределения акустического давления [5], где пунктирные линии соответствуют пучностям акустического давления

что разработанный метод может служить эффективным инструментом визуализации и мониторинга ультразвуковых полей в установках, используемых для обогащения руд, очистки поверхностей и сурохимических процессов, что позволяет оптимизировать их рабочие параметры.

Представленные в данной главе результаты свидетельствуют о том, что в растворах соли NaCl и ПАВ SDS наблюдается общая картина снижения активности кавитационных событий, что может повлиять на использование ультразвука в процессе флотации, изменяя процессы образования и стабильности пузырьков, их взаимодействие с частицами руды и, как следствие, эффективность разделения минеральных компонентов.

Вторая глава посвящена изучению динамики газовых пузырьков вблизи твердых поверхностей с различной степенью смачиваемости под действием ультразвука. Детально исследованы особенности взаимодействия воздушных пузырьков с гидрофильными (кварц) и относительно гидрофобными (акрил, тefлон) поверхностями, проанализировано влияние ультразвукового воздействия на их поведение, включая колебания формы и эволюцию контактного угла.

Для проведения экспериментов была модернизирована установка, описанная в первой главе: вместо фотоаппарата Nikon D7200 была использована высокоскоростная камера Basler A504kc, и оснащенная теленцентрическим объективом камера Basler acA1920-155um. Газовые пузырьки генерировались через кварцевый капилляр с внутренним диаметром 0.3 мм. В качестве исследуемых поверхностей применялись относительно гидрофильное кварцевое стекло, акрил с промежуточными свойствами смачиваемости и относительно гидрофобный тefлон. Для регистрации процессов взаимодействия использовалась оптическая система, позволяющая регистрировать следующие особенности: прикрепление пузырьков к твердой поверхности, их колебания, отрыв от поверхности, а также изменение контактного угла (Рис. 6). Особое внимание было уделено анализу изменения контактного угла под действием ультразвука.

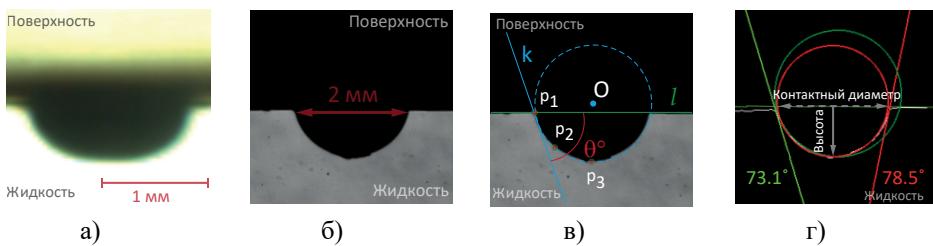


Рис. 6 — а) Изображение, получаемое в ходе эксперимента с использованием камеры Basler A504kc, б) Изображение, получаемое в ходе эксперимента с использованием камеры Basler acA1920-155um, в) Использование тангенциального метода обработки для измерения контактного угла, г) Результат программной обработки изображения.

Эксперименты показали принципиальные различия в поведении пузырьков на поверхностях с разной смачиваемостью. В случае гидрофильной кварцевой поверхности под действием ультразвука пузырек смещается в зону пониженного акустического давления, где совершают трансляционные колебания, сопровождающиеся изменением формы (Рис. 7), при этом он не закрепляется на поверхности из-за сохранения тонкой жидкой прослойки между пузырьком и пластины.

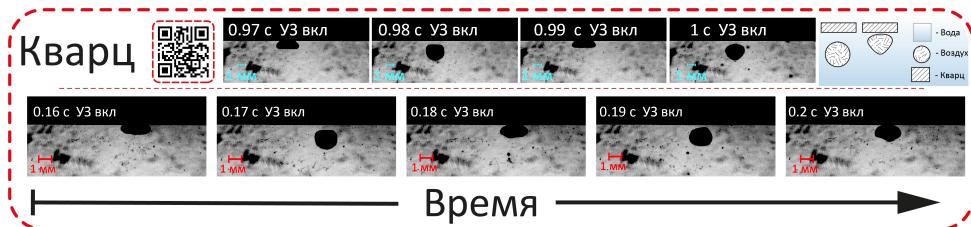


Рис. 7 — Трансляционные колебания воздушного пузырька вблизи гидрофильной поверхности кварцевого стекла под действием ультразвука

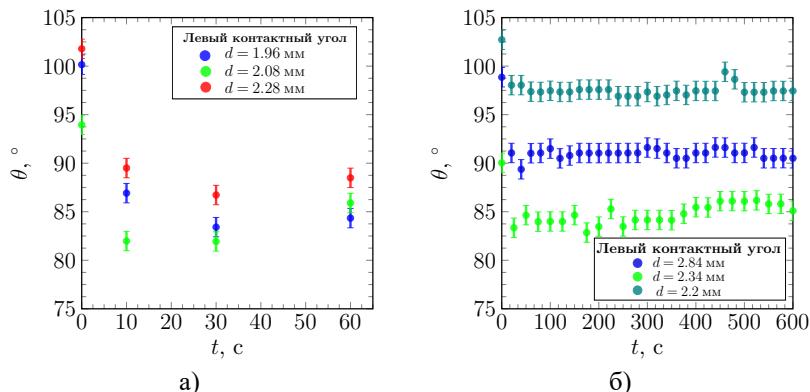


Рис. 8 — а) Изменение статического контактного угла на акриловой поверхности при различных продолжительностях воздействия ультразвука; б) Динамика релаксации краевого угла на акриловой поверхности после 10-секундного ультразвукового воздействия

На относительно гидрофобных (акрил и тefлон), в отличие от гидрофильных поверхностей наблюдается устойчивое закрепление. После смещения

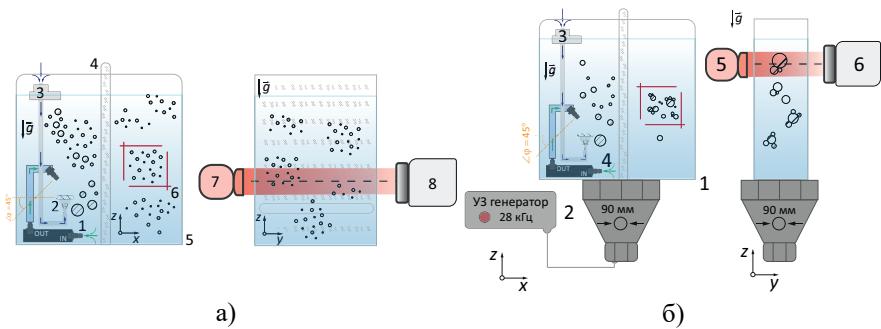


Рис. 9 — Схема экспериментальной установки: а) – без источника ультразвука: 1) погружной водяной насос; 2) кварцевая ультрафильтрационная мембранны; 3) воздушный компрессор; 4) ограничитель из оргстекла; 5) кювета размером $300 \times 30 \times 500 \text{ mm}^3$; 6) зона съёмки; 7) коллимированный источник света; 8) камера с телесцентрическим макрообъективом; б) – с источником ультразвука: 1) кювета размером $300 \times 30 \times 500 \text{ mm}^3$; 2) источник ультразвука частотой 28 кГц; 3) воздушный компрессор; 4) водяной насос; 5) коллимированный источник света; 6) камера, оснащенная телесцентрическим макрообъективом

в область низкого акустического давления пузырек закрепляется на поверхности, демонстрируя в дальнейшем лишь колебания формы с частотой, соответствующей частоте второй моды собственных колебаний формы сферического пузырька.

10-секундное ультразвуковое воздействие приводит к уменьшению статического контактного угла, что свидетельствует о гидрофобизации поверхности. Установившееся значение угла сохраняется неизменным в течение, как минимум, 10 минут после прекращения обработки (Рис. 8б). Наблюдаемое уменьшение контактного угла обусловлено модификацией поверхности под действием ультразвука, что согласуется с данными, приведенными в работе [6]. Более продолжительные эксперименты (5 минут) обнаружили дополнительные эффекты: постепенное увеличение размера пузырьков, обусловленное процессами коалесценции с микропузырьками и соответствующее снижение частоты колебаний. Результаты данной главы показывают, что ультразвуковое воздействие вызывает гидрофобизацию поверхности, что свидетельствует о потенциальном повышении эффективности флотационного процесса.

Третья глава посвящена исследованию влияния ультразвукового воздействия на характеристики воздушных пузырьков флотационного размера, генерируемых в воде и водных растворах NaCl и ПАВ (SDS) с использованием кварцевой ультрафильтрационной мембранны с диаметром пор 0.9 – 1.4 мкм (Рис. 9а-2, 9б-4) в присутствии потока жидкости направленного под углом 45° к поверхности мембранны. На рисунке 9а, 9б представлена конструкция экспериментальной установки.

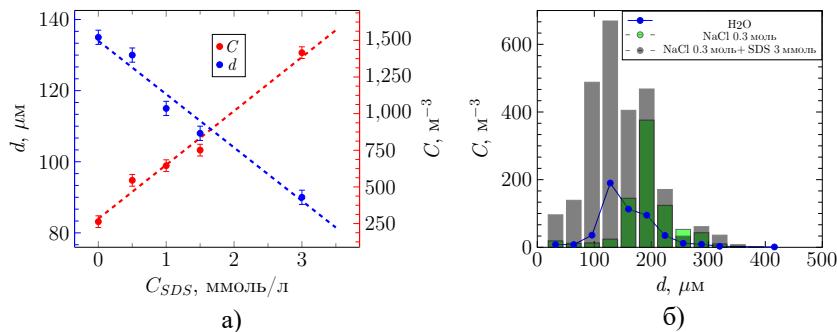


Рис. 10 — а) Зависимости объемной концентрации пузырьков и их диаметра от концентрации SDS; б) Гистограмма распределения пузырьков по размеру в воде, в водном растворе 0.3 моль/л NaCl и смеси 0.3 моль/л NaCl и 3 ммоль/л SDS

Добавление солей NaCl и ПАВ SDS в отсутствие ультразвукового воздействия приводит к увеличению количества пузырьков при одновременном уменьшении их среднего размера (Рис. 10а, 10б). При ультразвуковом воздействии наблюдается обратный эффект: снижение количества пузырьков при увеличении их среднего размера, что связано с интенсификацией процессов коалесценции (Рис. 11а, 11б).

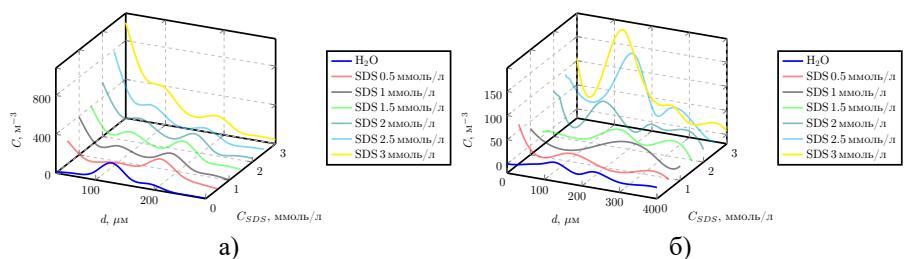


Рис. 11 — Каскадная диаграмма влияния SDS на диаметр и концентрацию пузырьков в жидкости: а) - до ультразвукового воздействия; б) - после ультразвукового воздействия

Особый практический интерес представляет обнаруженный в случае комбинированного раствора соли NaCl (0.3 моль/л) и ПАВ SDS (3 ммоль/л) (Рис. 10б) эффект компенсации взаимного влияния хлорида натрия (NaCl) и доцетилсульфата натрия (SDS) на распределение газовых пузырьков по размерам. В этом случае сохраняется распределение пузырьков по размеру, характерное для чистой воды, при десятикратном увеличении их количества в объеме.

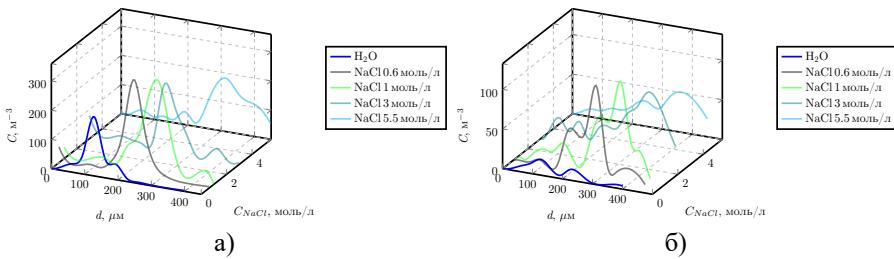


Рис. 12 — Каскадная диаграмма влияния NaCl на диаметр и концентрацию пузырьков в жидкости: а) - до ультразвукового воздействия; б) - после ультразвукового воздействия

Наблюдаемые эффекты позволяют с помощью ультразвука достигать оптимального размера и количества пузырьков, что существенно влияет на эффективность флотации за счёт увеличения вероятности столкновения частиц руды с пузырьками. Это особенно важно при флотации труднообогатимых тонковкрапленных руд. Применение ультразвукового воздействия позволяет регулировать дисперсный состав пузырьков до оптимального диапазона, повышая эффективность и экономичность процесса флотации.

В заключении приведены основные результаты работы, которые состоят в следующем:

1. Разработан, апробирован и применен метод исследования пространственно-временного распределения активности кавитационных событий вsonoхимическом реакторе, основанный на анализе тепловых карт разрушения алюминиевой фольги.
2. Исследовано распределение кавитационной активности вsonoхимическом реакторе с дистиллированной водой. Сопоставление полученных данных с результатами проведенного другими авторами численного моделирования распределения акустического давления в аналогичных условиях показало наличие корреляции между этими распределениями. Таким образом, экспериментальные данные о распределении зон активной кавитации в реакторе дают информацию о пространственном распределении акустического давления.
3. Экспериментально исследовано распределение активности кавитационных событий при ультразвуковом воздействии на водные растворы соли NaCl и ПАВ SDS. Найдено, что увеличение концентрации соли снижает активность кавитации, что связано с изменением физико-химических свойств жидкости — увеличением поверхностного натяжения и вязкости. Увеличение концентрации ПАВ уменьшает кавитационную активность по сравнению с чистой водой, что обусловлено уменьшением поверхностного натяжения и увеличением количества кавитационных зародышей.

4. Установлено, что пузырек не закрепляется на гидрофильной поверхности кварцевой пластины из-за наличия тонкой жидкой прослойки между ним и пластины. Ультразвуковое воздействие, приводящее к возникновению стоячей звуковой волны, вызывает перемещение пузырька вдоль пластины в область низкого давления. По достижении этой области пузырек совершает трансляционные колебания в направлении, перпендикулярном пластине, сопровождающиеся колебаниями формы.
5. В случае гидрофобной акриловой пластины, жидкая прослойка между пузырьком и твердой поверхностью не наблюдается. При этом после приближения к твердой поверхности, пузырек перемещается вдоль пластины в область низкого акустического давления, закрепляется на пластине, после чего наблюдаются только колебания формы. Аналогичное поведение пузырька наблюдается при ультразвуковом воздействии и для более гидрофобной по сравнению с акриловой, тефлоновой поверхности.
6. Обнаружено, что для гидрофобных твердых поверхностей, на коротких временных масштабах (около 10^{-2} с), наблюдаются колебания характеристик формы пузырька около некоторых средних значений с частотой, близкой к частоте второй моды собственных колебаний формы для сферического пузырька.
7. Обнаружен эффект необратимого изменения статического краевого угла после кратковременного (10 с) ультразвукового воздействия, который сохраняется неизменным в течение достаточно длительного времени после прекращения обработки.
8. Показано, что при повышении концентрации SDS в водном растворе, средний размер пузырьков, генерируемых с помощью мембранны в отсутствие ультразвука, уменьшается, а их концентрация в области съемки увеличивается, а в растворах NaCl при повышении концентрации наблюдается увеличение среднего размера пузырьков. Ультразвуковое воздействие в обоих случаях приводит к коалесценции пузырьков и, как следствие, к увеличению их среднего размера.
9. Установлен эффект комбинированного воздействия NaCl (0.3 моль/л) и SDS (3 ммоль/л), проявляющийся в том, что распределение пузырьков по размеру качественно соответствует распределению, наблюдаемому в чистой воде, при этом концентрация наблюдаемых пузырьков увеличивается на порядок.

Публикации автора по теме диссертации

A1. Experimental study of the acoustic pressure distribution in a sonochemical reactor / **M. Kuchinskiy**, T. Lyubimova, K. Rybkin, O. Fattalov // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1945. — IOP Publishing. 2021. — P. 012026. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1945/1/012026>.

A2. Experimental and numerical study of acoustic pressure distribution in a sonochemical reactor / **M. Kuchinskiy**, T. Lyubimova, K. Rybkin, O. Fattalov, L. Klimenko // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1809. — IOP Publishing. 2021. — P. 012025. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1809/1/012025>.

A3. Investigation of cavitation in NaCl solutions in a sonochemical reactor using the foil test method / **M. Kuchinskiy**, T. Lyubimova, K. Rybkin, A. Sadovnikova, V. Galishevskiy // Fluid Dynamics and Materials Processing. — 2024. — Vol. 20, no. 5. — P. 1093—1102. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1555256X24000158>.

A4. Influence of ultrasound on the dynamics of an air bubble near a solid surface / **M. O. Kuchinskiy**, T. P. Lyubimova, K. A. Rybkin, V. A. Galishevskiy, A. D. Sadovnikova // The European Physical Journal Special Topics. — 2024. — Vol. 233, no. 8. — P. 1695—1708. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1140/epjs/s11734-024-01243-x>.

A5. Investigation of generation and dynamics of microbubbles in the solutions of anionic surfactant (SDS) / T. Lyubimova, K. Rybkin, O. Fattalov, **M. Kuchinskiy**, M. Kozlov // Microgravity Science and Technology. — 2022. — Vol. 34, no. 4. — P. 74. — URL: <https://doi.org/10.1007/s12217-022-09977-w>.

A6. Распределения акустического давления и зон кавитационной активности в жидкости: численное моделирование и эксперимент / И. О. Сбоев, Т. П. Любимова, **М. О. Кучинский**, К. А. Рыбкин // Вычислительная механика сплошных сред. — 2025. — Т. 18, № 1. — С. 68—85. — URL: <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2025.18.1.6>.

A7. On the mechanism of selective fixation of bubbles under the action of ultrasound in NaCl and KCl solutions during degassing / T. Lyubimova, K. Rybkin, O. Fattalov, **M. Kuchinskiy**, M. Kozlov, A. Kugaevskaya // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1809. — IOP Publishing. 2021. — P. 012029. — URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1809/1/012029>.

A8. Method of generation, measurement of the size and number of microbubbles in NaCl and SDS solutions of different concentrations / K. Rybkin, **M. Kuchinskiy**, T. Lyubimova, M. Kozlov, O. Fattalov, I. Fattakhova, V. Sinitsyna // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 2317. — IOP Publishing, 2022. — P. 012007. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2317/1/012007>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zeqiri, B.* Studies of a novel sensor for assessing the spatial distribution of cavitation activity within ultrasonic cleaning vessels / B. Zeqiri, M. Hodnett, A. J. Carroll // Ultrasonics. — 2006. — Vol. 44, no. 1. — P. 73—82. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X05000673>.

2. *Verhaagen, B.* Measuring cavitation and its cleaning effect / B. Verhaagen, D. Fernández Rivas // Ultrasonics Sonochemistry. — 2016. — Vol. 29. — P. 619–628. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417715000723>.
3. Acoustic cavitation for agri-food applications: Mechanism of action, design of new systems, challenges and strategies for scale-up / X. Zhu, R. S. Das, M. L. Bhavya, M. Garcia-Vaquero, B. K. Tiwari // Ultrasonics Sonochemistry. — 2024. — Vol. 105. — P. 106850. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417724000981>.
4. *Abedini, M.* On the reasons for reduced cavitation erosion of alloys in water containing SDS and NaCl / M. Abedini, S. Hanke // Wear. — 2025. — Vol. 571. — P. 205792. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164825000614> ; 25th International Conference on Wear of Materials.
5. A numerical investigation of the effect of boundary conditions on acoustic pressure distribution in a sonochemical reactor chamber / I. Sboev, T. Lyubimova, K. Rybkin, M. Kuchinskiy // Fluid Dynamics & Materials Processing. — 2024. — Vol. 20, no. 6. — P. 1425–1439. — URL: <http://www.techscience.com/fdmp/v20n6/57192>.
6. Ultrasonic cavitation at solid surfaces / D. G. Shchukin, E. Skorb, V. Belova, H. Möhwald // Advanced Materials. — 2011. — Vol. 23, no. 17. — P. 1922–1934. — eprint: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adma.201004494>. — URL: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201004494>.

Кучинский Михаил Олегович

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЗЫРЬКОВ В
ЖИДКОСТИ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____