

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Пермский государственный национальный
исследовательский университет»

На правах рукописи



Кучинский Михаил Олегович

**Экспериментальное исследование динамики пузырьков в
жидкости при ультразвуковом воздействии**

Специальность 1.1.9 —

«Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

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

Пермь — 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	4
 ГЛАВА 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ	
 АКТИВНОСТИ КАВИТАЦИОННЫХ СОБЫТИЙ В	
 СОНОХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ	12
1.1 Введение	12
1.1.1 Ультразвуковые эффекты в жидкостях	14
1.1.2 Методы исследования акустических полей и регистрации	
кавитации	23
1.2 Модифицированный метод теста фольгой	28
1.3 Описание экспериментальных установок и методики измерений . .	30
1.4 Результаты экспериментов в дистиллированной воде	35
1.5 Результаты экспериментов с водными растворами соли NaCl	39
1.6 Результаты экспериментов с водными растворами ПАВ SDS	43
1.7 Заключение по главе	51
 ГЛАВА 2. ДИНАМИКА ПУЗЫРЬКОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ	
 УЛЬТРАЗВУКА ВБЛИЗИ И НА ТВЕРДЫХ	
 ПОВЕРХНОСТЯХ С РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ	
 СМАЧИВАЕМОСТИ	53
2.1 Введение	53
2.2 Описание экспериментальных установок и методики измерений . .	60
2.3 Результаты исследования поведения пузырька вблизи	
поверхностей различной степени смачиваемости	64
2.3.1 Эксперименты с поверхностью кварцевого стекла	64
2.3.2 Эксперименты с поверхностью акрила	69
2.3.3 Эксперименты с поверхностью тефлона	75
2.4 Заключение по главе	80

ГЛАВА 3. ГЕНЕРАЦИЯ ПУЗЫРЬКОВ С ПОМОЩЬЮ КВАРЦЕВОЙ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННОЙ МЕМБРАНЫ И ИХ ПОВЕДЕНИЕ В ВОДЕ И ВОДНЫХ РАСТВОРАХ NaCl И SDS ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ	82
3.1 Введение	82
3.2 Описание экспериментальных установок и методики измерений . .	87
3.3 Результаты	91
3.4 Заключение по главе	100
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	103
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	106

ВВЕДЕНИЕ

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 низкую 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 поиска зон активной кавитации при ультразвуковом воздействии, посвящена первая глава настоящей работы.

В связи с технологическими приложениями большой интерес представляет изучение механизмов взаимодействия пузырьков с твердыми поверхностями и между собой, поскольку ультразвук оказывает комплексное влияние как на сами газовые включения, так и на свойства твердых поверхностей. Современные иссле-

дования сосредоточены на анализе изменений характеристик поверхности и их влиянии на динамику пузырьков, что имеет принципиальное значение для практической реализации. Так, ультразвуковое воздействие активно применяется в производстве нанокompозитов, 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 результативность. 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 посвящена третья глава.

Важную роль в разделении руд методом флотации играют поверхностно-активные вещества и реагенты, обеспечивающие избирательную гидрофобизацию ценных компонентов руды. Интерес представляет применение ультразвуковой обработки при обогащении калийных руд, что обуславливает необходимость изучения влияния 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. Это обуславливает актуальность исследования генерации пузырьков в водных растворах ПАВ додецилсульфат натрия (SDS) и солей (NaCl).

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 мембраны.

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 колеба-

ния 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.

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 активности 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 мембраны, 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.

Теоретическая и практическая значимость работы: 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 анализ 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 целенаправленного 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 рабочих жидкостей 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 диссертационной работы метод, позволяющий получать данные о пространственно-временной эволюции кавитационной активности в реакторе. В качестве индикатора использовалась алюминиевая фольга толщиной 10 мкм, закреплённая на вертикальной рамке. Пространственное распределение кавитационных повреждений фиксировалось цифровой камерой с контровым освещением через равные временные интервалы.

Полученные изображения обрабатывались с помощью специализированного программного обеспечения на Python, включающего цифровую обработку изображения. Программа определяла момент времени, площадь и зоны разрушения фольги, что дало возможность получить количественные данные о пространственно-временном распределении кавитационной активности.

Для исследования динамики пузырьков на твердых поверхностях различной степени смачиваемости использовалась экспериментальная установка с кварцевым капилляром для генерации пузырьков и тремя типами твердых пластин: гидрофильным кварцем, акрилом и гидрофобным тефлоном. Процесс взаимодействия пузырьков с твердыми поверхностями регистрировался высокоскоростной камерой и камерой с телецентрическим объективом. Последующая

обработка позволяла анализировать характеристики формы пузырьков: контактный диаметр, краевой угол и высоту.

Генерация и анализ пузырьков флотационного размера. Пузырьки флотационного размера формировались с помощью кварцевой ультрафильтрационной мембраны при подаче воздушного потока. Распределение пузырьков по размеру определялось методами компьютерной обработки изображений. Результаты визуализировались в виде каскадных диаграмм распределения и графиков зависимости концентрации пузырьков от состава раствора.

Степень достоверности результатов 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/>), в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

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

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 8 печатных изданиях [1—8], 8 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, из них 7 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 126 страниц, включая 46 рисунков. Список литературы содержит 164 наименования.

Благодарности. Автор выражает глубочайшую благодарность своему научному руководителю, Татьяне Петровне Любимовой, за экспертные рекомендации, конструктивную критику и помощь в преодолении трудностей, возникавших в процессе работы. Спасибо за терпеливое обучение не только сути исследования, но и тому, как грамотно его представить научному сообществу.

Тепло благодарит коллектив лаборатории межфазной гидродинамики Пермского государственного университета за создание творческой атмосферы и неоценимую помощь в исследованиях.

Особая признательность адресована Константину Анатольевичу Рыбкину за плодотворное сотрудничество, ценные советы и дружескую поддержку, которые сделали этот научный путь значительно ярче и интереснее.

ГЛАВА 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОСТИ КАВИТАЦИОННЫХ СОБЫТИЙ В СОНОХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ

1.1 Введение

Ультразвуковое воздействие вызывает совокупность физико-химических эффектов, изучение которых в XX веке привело к становлению самостоятельного научного направления — сонохимии (звукохимии) [9; 10]. Это направление исследует взаимодействие мощных акустических волн с веществом, а также кинетику и механизмы индуцированных ими реакций [11].

Движущей силой сонохимических процессов является акустическая кавитация — процесс зарождения, роста и схлопывания микропузырьков газа в жидкости. Как отмечается в литературе [12], феномен кавитации был впервые описан Торникрофтом и Барнаби [13] в 1895 году при изучении эрозии гребных винтов. Интенсивное изучение его химических последствий началось позднее: в 1930-х годах Брохултом [14] и другими исследователями было обнаружено, что ультразвук может вызывать деградацию биологических и синтетических полимеров.

Важным этапом стало открытие Френцелем и Шульцем [15] в 1935 году явления сонолюминесценции — свечения жидкости под действием ультразвука, что косвенно указывало на экстремальные условия внутри схлопывающихся пузырьков. Позже, в 1944 году, Вайс [16] обнаружил, что ультразвуковая обработка воды приводит к образованию водородных и гидроксильных радикалов, а в 1950-х годах Парк и Тейлор [17] представили первые прямые экспериментальные доказательства генерации ОН-радикалов в водных растворах, что положило начало систематическим исследованиям сонохимических реакций в органических средах.

Коллапс кавитационных пузырьков [12], длящийся порядка микросекунды, создаёт уникальные условия: локальные температуры могут достигать 5000 К, а давление — 1000 атм. Возникающие «горячие точки» ответственны за химические эффекты (расщепление молекул, генерация радикалов) и физические (ударные волны, микроструи, акустические течения).

Благодаря этим эффектам сонохимия нашла широкое применение в различных технологических областях, включая синтез наноматериалов, органический синтез, очистку воды и стоков (разложение загрязнителей, обеззараживание), биотехнологии, пищевую и фармацевтическую промышленность [18].

Однако, несмотря на значительный прогресс, сохраняется ряд нерешённых проблем. К ним относятся сложность моделирования и контроля кавитации в гетерогенных системах, недостаточная изученность механизмов влияния ультразвука на биологические объекты (ферменты, клетки), проблемы масштабирования процессов и их энергоэффективности. Вопросу контроля кавитации в многофазных средах частично посвящена настоящая глава.

Современный анализ тенденций в области обогащения полезных ископаемых свидетельствует о том, что, несмотря на более чем столетнюю историю применения, флотация сохраняет статус наиболее эффективного метода разделения минералов.

Флотационный процесс представляет собой сложную систему, эффективность которой определяется совокупностью физико-химических и гидродинамических факторов [19; 20]. Помимо основного механизма селективного прилипания гидрофобных частиц к воздушным пузырькам с последующим образованием пенного продукта, значительное влияние на процесс оказывают сопутствующие явления:

- отрыв частиц от пузырьков и их оседание,
- гидродинамическая нестабильность флотационной пульпы.

Эти факторы существенно снижают как скорость процесса, так и его селективность [21].

Перспективным направлением интенсификации флотационного процесса является применение различных внешних воздействий, в частности ультразвукового поля. Ультразвуковая обработка позволяет:

- модифицировать физико-химические свойства жидкой фазы пульпы [22],
- изменять структуру гидратных слоёв на поверхности частиц [23],
- повышать эффективность газо-жидкостного массообмена [24],
- усиливать селективность разделения минеральных компонентов [25].

Важную роль в понимании механизмов ультразвукового воздействия играют исследования в области вибрационной механики – раздела механики, изучающего поведение систем под действием вибраций. Например, в работах [26—28] разработаны теоретические основы вибрационной механики и реологии, которые позволяют анализировать усреднённое движение частиц и пузырьков в осциллирующих жидкостях. Эти исследования показывают, что вибрации могут вызывать такие эффекты, как всплытие тяжёлых частиц и погружение лёгких пузырьков, что имеет прямое отношение к процессам флотации и сонохимии.

В работах [29—32] исследуется динамика поверхностей раздела и взаимодействие пузырьков с твёрдыми частицами в осциллирующих жидкостях. Показано, что резонансные эффекты и наличие ПАВ могут существенно влиять на характер взаимодействия, что необходимо учитывать при проектировании ультразвуковых устройств для флотационных процессов.

1.1.1 Ультразвуковые эффекты в жидкостях

Для проведения реакций, требующих внешнего акустического воздействия, используются сонохимические реакторы, отличительной особенностью которых является наличие источника акустических колебаний. В роли таких источников могут выступать ультразвуковые излучатели. В основе их конструкции лежит либо пьезоэлектрический эффект, либо эффект магнитострикции. Эффект магни-

тострикции был обнаружен Джеймсом Джоулем в 1842 году, а первые практические ультразвуковые излучатели на основе магнитострикции появились в 1920-х. В основе магнитострикционных излучателей лежит эффект изменения размеров ферромагнитного материала (никель, ферриты и др.) под действием магнитного поля. Это свойство позволяет преобразовывать электромагнитную энергию в механические колебания ультразвуковой частоты.

Открытие пьезоэлектрического эффекта восходит к экспериментальным работам братьев Кюри (1880 г). Он проявляется в том, что при растяжении или сжатии некоторых материалов (кристаллов) вдоль определенных направлений на их поверхности индуцируется заряд, при этом величина этого заряда изменяется пропорционально приложенному давлению. Используя обратный пьезоэлектрический эффект (возникновение механических деформаций в выделенном направлении при воздействии электрического поля), удастся создать пьезоэлектрический ультразвуковой излучатель, в котором за счет подачи высокочастотных электрических колебаний на пьезопластину происходит процесс их преобразования в звуковые. Обратный пьезоэлектрический эффект и эффект магнитострикции позволяют создавать мощные (превышающие кавитационный порог) акустические колебания в диапазоне от 15 – 20 кГц до 1 МГц [11; 33].

Звуковые волны, распространяющиеся в жидкостях и газах, представляют из себя продольные колебания [34]; колебания среды в этом случае происходят в направлении распространения звуковой волны, то есть звуковые волны состоят из чередующихся областей сжатия и разрежения. Такое волновое движение, при котором звуковая волна распространяется в среде за счет колебаний молекул среды, называют звуковым импульсом, в результате возникают перепады давления. Зная частоту акустических колебаний (f) и скорость звука (c) в среде, можно найти возникающую длину волны $\lambda = c/f$. Для используемого в работе ультразвукового излучателя с частотой $f = 28$ кГц скорость звука в воде при нормальном атмосферном давлении и температуре 25° , составляет $c = 1497$ м/с, то есть возникающая длина волны оказывается равной $\lambda = 5.35$ см (0.0535 м).

При распространении звуковой или ультразвуковой волны в сосуде, заполненном жидкостью, наблюдается отражение волн, когда волна достигает границы раздела между двумя средами (воздухом и жидкостью, двумя разными жидкостями или жидкостью и твердой стенкой реактора), часть энергии отражается, а часть продолжает распространение в новой среде (см. например [35; 36]). Отражение акустических волн от границ раздела сред с различными акустическими импедансами $Z = \rho c$, где ρ - плотность среды, а c - скорость звука в среде, приводит к формированию сложных интерференционных структур. Для определения коэффициента отражения применяется следующая формула [37]:

$$\Gamma = \frac{(Z_{\text{пад}} - Z_{\text{отр}})}{(Z_{\text{пад}} + Z_{\text{отр}})}, \quad (1.1)$$

где $Z_{\text{пад}}$ - импеданс среды из которой падает ультразвуковая волна, $Z_{\text{отр}}$ - импеданс среды, которая отражает волну. К примеру, для границы раздела вода-акриловое стекло, импедансы которых составляют $Z_1 = 1.5 \cdot 10^6$ Па·с/м (вода) и $Z_2 = 3.15 \cdot 10^6$ Па·с/м (акриловое стекло), получается значение коэффициента отражения $\Gamma \approx 0.36$. В этом случае 36% падающей на границу раздела энергии отражается обратно в воду, а оставшиеся 64% проникают и распространяются в акриловом стекле. При попадании ультразвуковой волны на границу раздела вода-воздух ($Z_3 = 417$ Па·с/м) коэффициент отражения оставляет $\Gamma \approx -0.9994$. Знак минус указывает на то, что отраженная волна отличается по фазе от падающей волны на 180° . Таким образом, когда падающая волна является сжимающей, отраженная волна является растягивающей, и наоборот. При перпендикулярном падении акустической волны на плоскую границу раздела двух сред, обладающих разными акустическими импедансами, возникает стоячая волна.

В технологических приложениях [38] для создания акустических колебаний используются излучатели сфокусированного или несфокусированного типа, представленные на рисунке 1.1. Различие между данными типами излучателей проявляется в характеристиках создаваемых звуковых импульсов: сфокусированный источник порождает импульсы с меньшим диаметром по сравнению с

несфокусированным. В большинстве технических приложений используются источники несфокусированного типа.

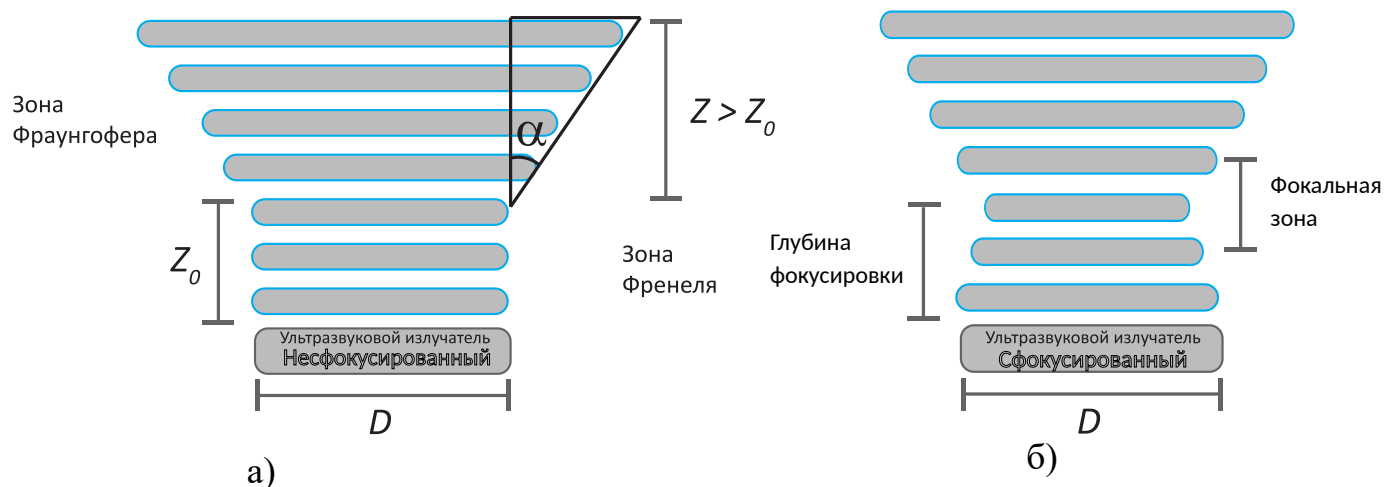


Рисунок 1.1 — Характеристики ширины луча и диаметра импульса для несфокусированных (а) и сфокусированных (б) источников ультразвука

Известно [38], что ультразвуковое поле плоского цилиндрического акустического излучателя сосредоточено в цилиндрическом объеме диаметром D и высотой Z_0 . Начиная с расстояния $Z_0 = D^2/(4\lambda)$, поле конически расширяется. Интервал от излучателя до Z_0 называется ближней зоной или зоной Френеля. Область $Z > Z_0$ называется дальней зоной или зоной Фраунгофера (Рис. 1.1), в ней амплитуда давления уменьшается пропорционально расстоянию от излучателя. Пример расчетов зон Френеля и Фраунгофера для дистиллированной воды представлен в работе [39], посвященной экспериментальному изучению акустических течений при воздействии ультразвука частотой 40 кГц. Эксперименты проводились при различных мощностях ультразвука в дистиллированной воде и водных растворах солей NaCl и KCl. В случае дегазированной дистиллированной воды, скорость распространения ультразвука составляла $c = 1500$ м/с, а длина волны $\lambda = 37.5$ мм. Ширина зоны Френеля в таких условиях составила $Z_0 = 2.34$ см, а зона Фраунгофера располагалась на расстоянии около 2 см от источника. Синус угла α между направлением распространения ультразвуковой волны и источником ультразвука связан с геометрическими параметрами установки формулой $\sin \alpha = A\lambda/D$, где коэффициент A для круглой пластины составлял 1.22. В таком

случае в ближней зоне (Френеля) при $Z < Z_0$ интенсивность ультразвуковых колебаний могла иметь несколько максимумов. В дальней зоне (Фраунгофера) при $Z > Z_0$ интенсивность волны имела один максимум и уменьшалась по мере удаления от оси пучка. Такое поведение связано с эффектом ослабления звуковых волн при их распространении в среде. Для определения величины затухания интенсивности звука используется следующее выражение (см. например [34]):

$$I_i = I_0 \exp(-2\alpha x), \quad (1.2)$$

где x - расстояние от источника акустических колебаний, α коэффициент затухания, I - интенсивность ультразвука (энергия, проходящая в единицу времени через единичную площадку, ориентированную перпендикулярно к направлению распространения волны). Коэффициент затухания в этом случае с учетом вязкости и теплопроводности находится из формулы Киргофа:

$$\alpha = \frac{(2\pi f)^2}{2\rho c^3} \left[\frac{4}{3}\eta + \chi \left(\frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_p} \right) \right], \quad (1.3)$$

где ρ - плотность среды, c - скорость ультразвука, η - коэффициент динамической вязкости, χ - коэффициент температуропроводности, C_v - теплоемкость при постоянном объеме, C_p - теплоемкость при постоянном давлении.

При быстром локальном понижении давления в жидкости до значений, приближающихся к пределу ее прочности на разрыв, возникает явление кавитации — нарушения сплошности среды с образованием пузырьков [34].

В зависимости от механизма возбуждения различают:

- Акустическую кавитацию, представляющую собой процесс образования кавитационных пузырьков, возникающий при создании в жидкости отрицательных давлений за счет акустического воздействия. Как показано в классической работе [40], при использовании магнитострикционного излучателя, погруженного в жидкость, высокочастотные колебания стержня генерируют интенсивную акустическую волну, характеризующуюся чередованием зон сгущения и разрежения. Физический механизм кавитации заключается в следующем: в фазе акустического разрежения,

когда локальное гидростатическое давление опускается ниже давления насыщенных паров жидкости, среда подвергается растягивающим напряжениям, превышающим её прочность на разрыв. Это приводит к нарушению сплошности жидкости с образованием кавитационного пузырька. В последующей фазе сгущения происходит резкое сжатие пузырька. Если при этом не происходит его полного разрушения, устанавливается стабильный режим пульсаций, синхронизированных с частотой ультразвукового воздействия.

- Гидродинамическую кавитацию, можно наблюдать в условиях интенсивного течения жидкости, когда локальное давление в отдельных областях потока опускается ниже давления насыщенных паров (например, при обтекании препятствий или высокой скорости движения твердых тел относительно жидкости.)

Процесс кавитации сопровождается рядом нелинейных эффектов, включая генерацию ударных волн при коллапсе части вновь образованных пузырьков. Качественное различие между гидродинамической и акустической кавитацией, помимо механизмов их возбуждения, проявляется в характерных размерах образующихся парогазовых полостей [11]. При гидродинамической кавитации, образуются крупные парогазовые пузырьки размером 1 – 10 мм. В отличие от этого, акустическая кавитация, индуцированная ультразвуковым полем (20 – 100 кГц), генерирует пузырьки диаметром 0.01 – 0.1 мм.

Кавитация вызывает ряд эффектов, некоторые из которых являются вредными и требуют разработки средств борьбы с ними. К наиболее выраженным негативным последствиям кавитации можно отнести: эрозию рабочих поверхностей (лопастей гребных винтов, теплообменников, насосных колес), приводящую к деградации гидродинамических параметров (снижению упора, крутящего момента, КПД), а также ухудшению теплообменных характеристик в системах охлаждения. Напротив, ряд эффектов оказываются весьма полезными: уничтожение вредных микроорганизмов, диспергирование твердых и жидких веществ,

инициирование химических реакций, очистка деталей сложной формы, разрушение оксидных пленок при пайке легкоокисляющихся металлов [26; 41].

Акустическая кавитация подразделяется на инерционную, связанную с образованием и коллапсом парогазовых пузырьков при критическом растяжении жидкости, и неинерционную, проявляющуюся в виде устойчивых низкоамплитудных колебаний газовых пузырьков без фазовых превращений. В зависимости от метода регистрации удастся определить химический порог кавитации, соответствующий началу генерации активных радикалов и химических реакций, и механический порог, характеризующий минимальную интенсивность ультразвука, необходимую для устойчивого зарождения и коллапса кавитационных пузырьков.

Химический порог кавитации исследовался в работе [42] с использованием метода, основанного на сонолюминесценции. В этом случае для возникновения химических эффектов необходима локализация высокой температуры и давления, которая будет приводить к пиролизу и, как следствие, образованию свободных радикалов. Если же исследование порогов кавитации производится с использованием методов эрозии, то говорят о механическом пороге кавитации, который связан с возникновением ударных волн и микроструй при коллапсе пузырьков. Исследование разницы порогов химической и механической кавитации в диапазоне частот от 22 до 4880 кГц было проведено в работе [43]. Найдено, что в диапазоне от 22 до 43 кГц пороги химической и механической кавитации практически совпадают, а при более высоких частотах в диапазоне от 98 до 488 кГц механический порог кавитации оказывался выше химического. Обнаружено, что для достижения механического порога кавитации для 22 и 43 кГц амплитуда давления должна составлять порядка 20 кПа и 23.1 кПа соответственно. Выражение для порогового значения давления, после которого будет наблюдаться процесс кавитации, представлено в работе Богуславского [44]:

$$p_{кр} \sim \frac{(6\rho)^{2/5}(p_{арf})^{4/5}}{\zeta^{4/5}\rho^{1/5}c^{2/5}}, \quad (1.4)$$

где ρ - плотность жидкости, p_a - амплитуда переменного звукового давления, r - расстояние от центра пузырька до точки измерения звукового давления, f - частота ультразвука, ζ - некоторая постоянная связанная с интенсивностью звука, c - скорость звука в среде.

В качестве количественного критерия механического порога кавитации, соответствующего акустическому порогу по давлению при ультразвуковом воздействии, используется следующее условие:

$$I > \frac{1}{2} \frac{p_a^2}{\rho c}, \quad (1.5)$$

где I - интенсивность звука, ρ - плотность жидкости, p_a - амплитуда переменного звукового давления, c - скорость звука в среде. О порядке пороговой интенсивности звука можно судить из [45], где для водопроводной воды и излучателя частотой 15 кГц указан диапазон $1 \div 2$ Вт/см². Для ультразвуковых диагностических датчиков, используемых в медицинских целях, где кавитация должна отсутствовать, интенсивность составляет порядка нескольких милливатт на квадратный сантиметр [38]. Акустическая кавитация возникает только при одновременном выполнении двух условий: достаточной амплитуде давления (или интенсивности ультразвука) и оптимальной частоте, так как высокие частоты требуют большей энергии для преодоления инерционных сил жидкости.

Как уже обсуждалась выше, в сонохимическом реакторе при воздействии ультразвука в жидкости может возникать разрыв сплошности, способствующий инициации процесса нуклеации (зародышеобразования), в результате чего образуются кавитационные пузырьки. Следующим этапом развития является их рост за счет ректификационной диффузии (диффузии растворенного в жидкости газа через поверхность пузырька за счет разности концентраций газа внутри и снаружи) и коалесценции с другими кавитационными пузырьками. Этот процесс продолжается до момента достижения ими резонансного размера. На следующем этапе пузырьки, достигшие резонансного размера, в результате сжатия и разрежения, схлопываются с образованием кавитационной струи (micro-jet), воздействие которой в свою очередь может приводить к механической эрозии поверхности,

находящейся вблизи сколлапсировавшего пузырька. Если же пузырек находится в процессе роста и достигает размеров, превышающих резонансные, то он не будет схлопываться в результате акустической кавитации. Более наглядно данную картину эволюции пузырьков от зарождения (нуклеации) до стадии коллапса можно найти в статье [46]. В этой работе помимо эволюции пузырька также подробно рассматривается направление кавитационной струи в ходе коллапса: обнаружено, что кавитационная струя, образуемая вблизи вогнутой поверхности, содержащей газ, будет направлена от поверхности, а в случае плоской поверхности - к ней. Об особенностях связи между развитием кавитационного процесса и формой поверхности сообщалось в работе Чжоу и Хэммита [47], в которой найдено, что технологии обработки поверхности влияют на поведение кавитационной струи.

В исследованиях [48; 49] подчёркивается роль ультразвука в интенсификации массообмена и решении экологических задач. Теоретические основы нелинейных волновых процессов в таких системах рассмотрены в работе [18].

В работах [50—52] показано, что ультразвуковая обработка может значительно повысить кинетику флотации, особенно в многозонных аппаратах типа «реактор-сепаратор». При флотации образующаяся кавитационная струя, как показано в работе [53], устраняет поверхностную пленку (гидратные слои толщиной 2-50 нм), в результате чего процесс прикрепления пузырьков к извлекаемым минералам улучшается. Кроме того, как отмечено в [54], возникающая кавитационная струя приводит к разрушению ассоциатов и крупных молекулярных скоплений реагентов, негативно влияющих на селективность их адсорбции, что также оказывает положительное влияние на флотацию. Ключевой эффект обусловлен самим процессом коллапса кавитационных пузырьков, при котором происходит локальное выделение энергии в виде высоких температур и давлений. Это приводит к возникновению кавитационных струй и интенсификации процесса за счет физико-химических изменений на границах раздела фаз, что напрямую связано с сонохимическими явлениями. Поэтому важно понимать в какой области сонохимического реактора происходит активная кавитация и как эти зоны можно расширить. Данная задача непосредственно связана с пространственной

регистрацией и исследованием полей акустического давления, так как именно в пучностях акустической волны наиболее сильно проявляется процесс акустической кавитации.

1.1.2 Методы исследования акустических полей и регистрации кавитации

В случае сонохимического реактора заполненного жидкостью, акустические колебания создают неоднородное поле давления с областями пониженного и повышенного давления, что приводит к созданию зон различной плотности жидкости. В работе [55] экспериментально и численно исследовалось распределение акустического давления от источника ультразвука с частотой 20 кГц. Кювета имела форму параллелепипеда, а в качестве источника ультразвука выступал излучатель в форме рупора, который был частично погружен в жидкость. С помощью гидрофона производилось картирование (последовательное сканирование акустического поля с фиксацией амплитуды давления в каждой точке) областей пониженного и повышенного давления как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении. Данная работа прежде всего была направлена на моделирование распределения акустического давления с использованием пакета программ COMSOL Multiphysics, но она также позволяет судить и о неоднородности поля давления, обусловленной зависимостью от геометрических параметров реактора и свойств среды, в которой распространяются акустические колебания.

Для сонохимических реакторов, используемых для очистки поверхностей с использованием ультразвука, важно увеличение зон кавитационной активности, то есть зон, в которых интенсивно происходит процесс акустической кавитации. Для достижения этой цели на данный момент используется целый ряд методов регистрации и изучения зон активности кавитации, которые можно классифицировать следующим образом:

1. механический метод [56],

2. химический метод [57],
3. акустический метод [58],
4. оптический метод [59],
5. электрохимический метод [60],
6. гибридный метод [61].

В основе механического метода лежит эффект эрозии материала под действием кавитации. Довольно распространенным вариантом этого метода является так называемый тест фольгой (foil test), в основе которого лежит процесс разрушения фольги. Обычно для теста используется натянутая на жесткую рамку фольга, которую располагают в некоторой области реактора, а затем подвергают воздействию ультразвука, после чего визуально регистрируют повреждения, возникшие под действием ультразвука. Так, в работе [62] данный метод был использован для сравнения двух различных видов ультразвуковых реакторов. Самым главным плюсом «foil test» большинство исследователей называют простоту интерпретации данной методики, быстроту получения результатов, а также коррозионную стойкость. Недостатками механического метода являются отсутствие возможности получения результатов в реальном времени, а также влиянии фольги на конфигурацию сонохимического реактора, а значит на распределение кавитационной активности.

В основе химического метода регистрации кавитации лежит эффект сонолюминесценции – возникновения слабого оптического излучения при коллапсе кавитационных пузырьков. Примеры использования данного метода с преимуществами и недостатками приведены в работе [63], где представлен сравнительный анализ трех ключевых химических методов дозиметрии ультразвуковой кавитации: метод Фрике, йодный метод, терефталатный метод. В работе [64], посвященной исследованию воздействия ультразвука на процесс окрашивания волос, для регистрации кавитационной активности был применен йодидный метод дозиметрии, подробно описанный в [65]. Метод основан на облучении ультразвуком водного раствора йодида калия (KI), в результате чего под действием кавитационных радикалов (преимущественно OH) происходит окисление иодид-ионов (I^-)

до молекулярного йода (I_2). Образовавшийся I_2 затем взаимодействует с избыточными иодид-ионами, формируя интенсивно окрашенный трийодидный комплекс (I_3^-), концентрация которого определяется спектрофотометрически по оптической плотности при характерной длине волны 355 нм. Из плюсов данного метода можно выделить возможность прямого наблюдения кавитационной активности, а также возможность использования данного метода в сонохимических реакторах различной геометрии. К недостаткам дозиметрических измерений прежде всего относят сложность калибровки из-за чувствительности методики к окружающим условиям, что требует дополнительной коррекции результатов или применения мер для минимизации влияния неблагоприятных факторов. Это также включает необходимость использования специализированного оборудования, способного детектировать изменения в освещенности при ультразвуковом воздействии. Кроме того, применимость некоторых дозиметрических методов ограничена для определенных типов реакций или условий, что сужает возможности их практического использования. Также использование химических реагентов зачастую приводит к их накоплению внутри сонохимических реакторов, что может приводить к недостоверности получаемых результатов. Кроме того, концентрация реагентов влияет на распределение ультразвука внутри сонохимического реактора.

Примером акустического метода является использование гидрофона. Так в [58] исследовалась динамика пузырьков и интенсивность кавитации в миллиметровых каналах под действием ультразвука. Использование гидрофона применительно к этой задаче позволило исследователям изучить интенсивность кавитации, используя субгармонический спектр. Довольно часто гидрофон используется для поиска зон активной кавитации, а также для получения пространственного распределения звукового давления. К плюсам данного метода можно отнести получение количественных характеристик УЗ поля давления. Недостатками этого метода является его локальность в пространственных измерениях, а также влияние измерительного зонда на распределение ультразвука. Кроме того, довольно много проблем вызывает обработка и, соответственно,

интерпретация результатов. Так, например, в работе [66] рассматривается проблема «кавитационного шума». Данный вопрос широко обсуждается в научной литературе и в 2019 году Международная электротехническая комиссия выпустила технический стандарт для измерения кавитационного шума, однако даже это не смогло решить проблему полностью. В работе [67] также отмечается, что в процессе измерений под воздействием активной кавитации гидрофоны могут быть повреждены.

Ввиду несовершенства ранее описанных методов исследования кавитационных событий, зачастую используются гибридные методы [68] или их комбинация [58].

В [69] была произведена модификация механического метода разрушения фольги, в отличие от классического метода «foil test» авторы следили не за площадью разрушения, а за потерей массы фольги. Кроме того, в этой работе был предложен метод фиксации зон активной кавитации на основе термозонда (модифицированной термопары).

Сравнительный анализ применения тринадцати методов оценки акустической кавитации включая механические и химические представлена в работе Лейтона [70] (COMORAC - «Характеристика мер эталонной акустической кавитации»). В ней даются оценки технических аспектов применения различных методов оценки акустической кавитации. В качестве одного из способов регистрации кавитационной активности в работе также использовался «foil test», однако в условиях сравнительного тестирования не удалось получить адекватных результатов, так основная активность была сфокусирована на поверхности фольги вблизи металлической рамки, сильно влиявшей на распределение. Эта проблема была решена авторами статьи [71], в которой также производилось сравнение foil test с другими и был изготовлен и протестирован новый датчик для измерения кавитационных событий.

В работе [72], посвященной изучению кавитационной эрозии и коррозии металлов в растворе NaCl, было обнаружено, что присутствие соли высокой концентрации ускоряет процесс деградации поверхности алюминиевой фольги.

Данное явление объясняется присутствием ионов хлора, разрушающих оксидную пленку на поверхности алюминия. Авторы связывают этот эффект с синергетическим действием двух факторов: с одной стороны, хлорид-ионы (Cl^-) разрушают защитную оксидную пленку (Al_2O_3) посредством механизма точечной коррозии, а с другой - обнаженная металлическая поверхность становится более восприимчивой к механическому воздействию кавитационных микроструй и ударных волн, возникающих при коллапсе пузырьков. Совместное влияние микроструй, направленных к твердой стенке при коллапсе воздушных пузырьков, и ионов хлора способствует более быстрой эрозии металлической фольги.

Несмотря на большое количество методов оценки активности кавитационных событий, ни один из представленных методов оценки не является стандартным (общепринятым) [66]. В работе [73] отмечается, что создание идеального сенсора пока не приблизилось к своему завершению, а имеющиеся на данный момент средства имеют как положительные, так и отрицательные стороны. Поэтому в каждом случае необходимо искать методы измерения, подходящие именно под специфику данной задачи. Датчик кавитации должен не только позволять судить о наличии данного процесса, но и позволять количественно оценивать, визуализировать и следить за временной динамикой активности кавитационных событий в исследуемых системах.

В рамках диссертационного исследования вначале были проведены предварительные эксперименты по исследованию активности кавитационных событий, с использованием двух методов: термопарные измерения в соответствии с методикой Пугина [69] и пьезокерамический сенсор KS0272. Используемые в этих исследованиях экспериментальные установки приведены на рисунках 1.2а, 1.2б.

Рассмотренные методы, несмотря на свою информативность, обладают существенными ограничениями. Так, пьезокерамический датчик, будучи сравнительно крупногабаритным (≈ 20 мм), обеспечивает лишь интегральную оценку кавитационной активности, не позволяя определить расположение зон максимальной интенсивности. Кроме того, в присутствии солей NaCl сенсор работает некорректно, о чем свидетельствуют завышенные показания. Термопарный

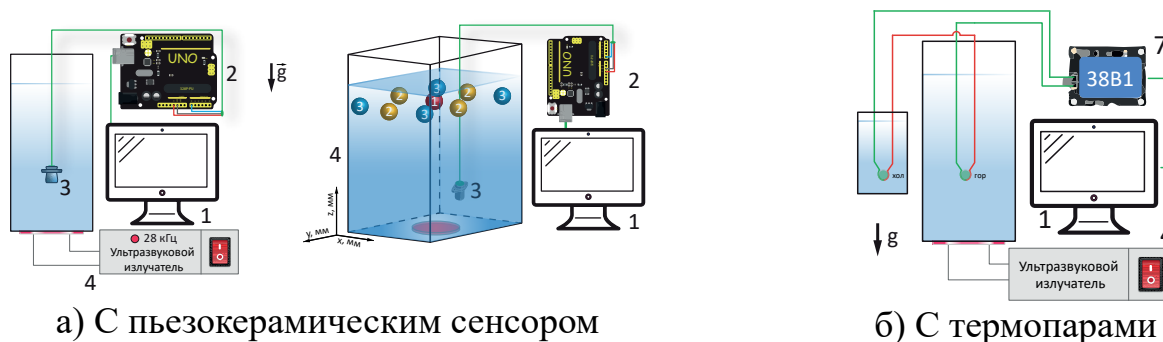


Рисунок 1.2 — Схемы экспериментальных установок: а) - с пьезокерамическим сенсором: 1. Персональный компьютер, 2. контроллер Arduino Uno, 3. пьезокерамический сенсор KS0272, 4. 28 кГц - источник ультразвука; б) - с термопарами: 1. Персональный компьютер, 4. 28 кГц - источник ультразвука, 7. линейка термопар

метод, несмотря на высокое пространственное разрешение, крайне уязвим к кавитационному воздействию: даже защитное покрытие из эпоксидной смолы не обеспечивает устойчивости термопар к кавитации. Кроме того, такое покрытие снижает чувствительность измерений, а неизбежное разрушение датчиков делает метод непригодным для длительных экспериментов.

Указанные ограничения рассмотренных методик обусловили поиск альтернативных подходов к исследованию активности кавитационных событий. Был разработан модифицированный метод оценки активности кавитационных событий на основе теста фольгой, позволяющий исследовать пространственное распределение и временную эволюцию кавитационной активности.

1.2 Модифицированный метод теста фольгой

В существующем виде метод теста фольгой (foil test) представляет собой простой и наглядный метод исследования кавитационной эрозии, основанный на визуальном анализе повреждений тонкой металлической фольги под воздействием кавитации. Процедура тестирования заключается в следующем: образец алюминиевой фольги, толщиной 10 – 50 мкм, закрепляется в жидкой прозрачной среде на определенном расстоянии от ультразвукового излучателя.

После включения ультразвукового излучателя достаточной мощности в течение определенного промежутка времени наблюдается постепенное эродирование фольги, обусловленное коллапсом пузырьков и формированием микроструй (см. раздел 1.1.1).

По истечении этого промежутка производится визуальный анализ результатов, в котором основными оцениваемыми параметрами являются характеристики эрозии поверхности фольги (распределение повреждений: расположение отдельных проколов, зон интенсивного повреждения или участков полного разрушения). Полученные таким образом данные позволяют сравнивать кавитационную активность в различных условиях, но не обеспечивают высокой точности из-за субъективности визуальной оценки и отсутствия стандартизированных критериев анализа.

В отличие от существующего подхода, в данной работе регистрация процесса разрушения фольги осуществлялась с помощью цифровой камеры, что обеспечивало возможность отслеживания временной динамики разрушения.

В рамках диссертационной работы на основе метода теста фольгой разработан метод, обеспечивающий возможность отслеживания пространственно-временной динамики разрушения фольги. При этом регистрация разрушений осуществлялась с помощью цифровой камеры, а для количественного анализа полученных данных была разработана программа обработки изображений на Python (Рис. 1.5), позволяющая: отслеживать эволюцию повреждений во времени, определять площадь разрушенной поверхности, вычислять скорость разрушения материала.

В качестве критерия разрушения была выбрана относительная площадь разрушения - PD :

$$PD(\%) = \frac{S_d}{S_i} \cdot 100\%, \quad (1.6)$$

где S_d - площадь поврежденной поверхности, а S_i - полная площадь фольги до ультразвукового воздействия.

Предложенный метод позволял также построить трёхмерную картину пространственно-временной динамики кавитационных событий путем анализа серии двумерных срезов повреждений поверхности фольги.

1.3 Описание экспериментальных установок и методики измерений

Для изучения кавитационной активности в водных растворах NaCl и ПАВ (SDS) использовались два типа сонохимических реакторов, принципиальная схема которых представлена на рисунках 1.3 и 1.6.

В экспериментах с дистиллированной водой и растворами NaCl (концентрация 0.3 – 5.5 моль/л) применялся сонохимический реактор из акрилового стекла с толщиной стенок 3 мм, имеющий форму прямоугольного параллелепипеда с внутренними размерами $103 \times 102 \times 190 \text{ мм}^3$ (глубина $\times$ ширина $\times$ высота).

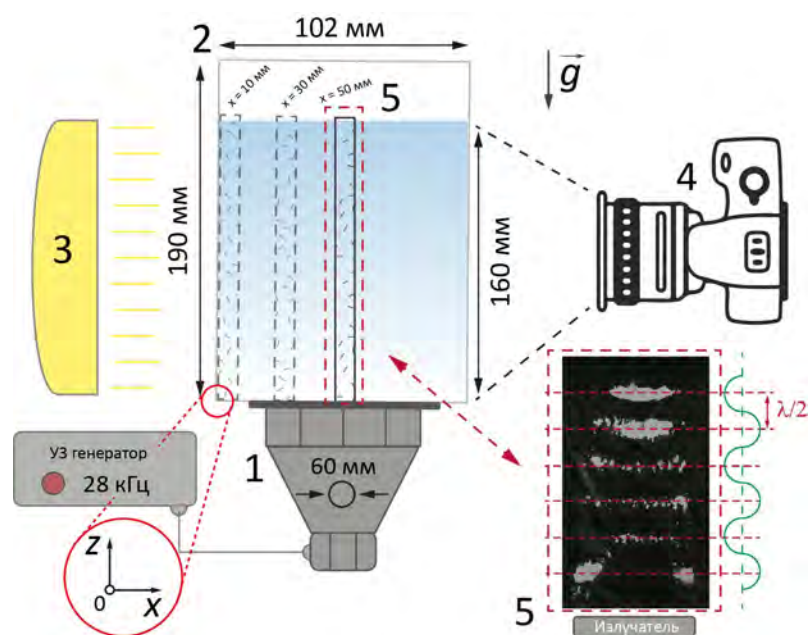


Рисунок 1.3 — Схема экспериментальной установки в экспериментах с дистиллированной водой и растворами NaCl: 1) 28 кГц - источник ультразвука; 2) кювета из акрилового стекла $103 \times 102 \times 190 \text{ мм}^3$ (глубина $\times$ ширина $\times$ высота); 3) источник света на основе IPS матрицы; 4) камера Nikon d7200; 5) рамка с фольгой

На нижней грани реактора было выполнено отверстие диаметром 90 мм, к которому с внешней стороны с помощью силиконового герметика крепилась

резиновая уплотнительная прокладка толщиной 8 мм. На данной прокладке аналогичным способом фиксировалась стальная пластина (диаметром 90 мм, толщиной 0.7 мм, изготовленная из нержавеющей стали). В центральную часть пластины с использованием эпоксидной смолы монтировался пьезокерамический излучатель Ланжевена с частотой $f = 28$ кГц и номинальной мощностью $P = 32$ Вт (Рис. 1.3, 1). Его ключевыми элементами являются стянутые центральным болтом две массивные пластины-подложки, между которыми расположены пьезокерамические кольца с электродами. При подаче на электроды переменного напряжения высокой частоты возникает обратный пьезоэффект, заставляющий керамические элементы циклически деформироваться. Эти механические колебания передаются через алюминиевый конус в среду (Рис. 1.4).

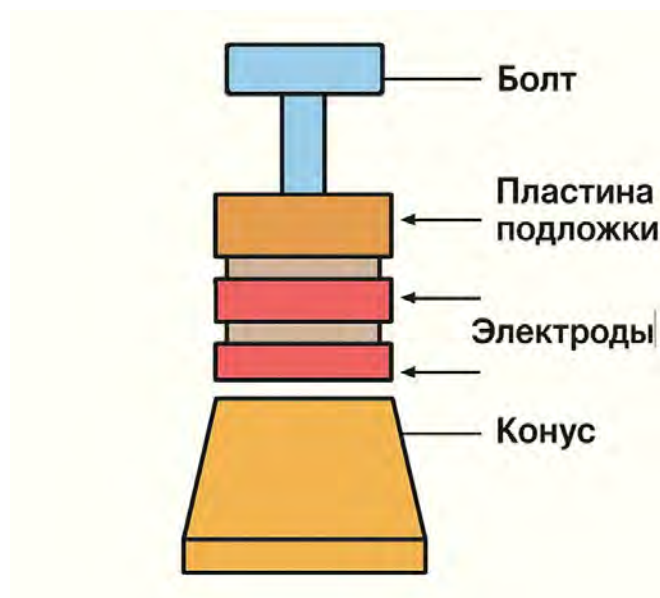


Рисунок 1.4 — Устройство излучателя Ланжевена

Во всех экспериментах в качестве рабочей жидкости применялась очищенная методом дистилляции (дистиллятор ДЭ-4) водопроводная вода с общей минерализацией (Total Dissolved Solids) менее 10 мг/л. Перед проведением экспериментов вода выдерживалась в течение 24 часов в помещении ($T_{\text{ком}} = 24 \pm 0.5^\circ\text{C}$) для стабилизации содержания растворенных газов при нормальных атмосферных условиях (давление 99.72 кПа, 748 мм рт.ст.). Рабочий объем жидкости в реакторе в случае экспериментов с дистиллированной водой и растворами NaCl составлял 1.6 л, что соответствовало высоте столба $h_{\text{жидкости}} = 160$ мм.

Во всех экспериментах в качестве эродируемого (разрушаемого) материала использовалась алюминиевая фольга толщиной 10 мкм. Для ее фиксации в жидкости она натягивалась на специально изготовленную рамку из PLA пластика. В экспериментах с дистиллированной водой и растворами NaCl использовалась рамка размером $165 \times 95 \times 5 \text{ мм}^3$ (высота $\times$ ширина $\times$ толщина). Зона исследования ограничивалась внутренней областью рамки размерами $160 \times 90 \text{ мм}^2$ (высота $\times$ ширина), что исключало влияние краевых эффектов на результаты измерений.

В качестве источника контрольного света использовалась IPS-матрица (жидкокристаллический дисплей, выполненный по технологии In-Plane Switching) (Рис. 1.3, 3) со светодиодной подсветкой на основе белых светодиодов, с плотностью пикселей 33.47 пкс/мм^2 , яркость матрицы составляла $5 \cdot 10^{-4} \text{ кд/мм}^2$ (500 нит).

Для регистрации областей разрушения фольги применялась цифровая камера Nikon d7200 с объективом Nikkor 50mm f/1.8D AF, расположенная на расстоянии 350 мм от центра кюветы (Рис. 1.3, 4). Производилась интервальная съемка со следующими параметрами: ISO 100, выдержка $1/10 \text{ с}$, диафрагменное число $f/5$. Длительность ультразвукового воздействия в экспериментах варьировалась от 300 до 1500 с. В ходе предварительных экспериментов было установлено, что 1500 секунд соответствуют практически полному разрушению фольги в центральной области сонохимического реактора, в то время как 300 секунд представляют оптимальный временной интервал для наблюдения максимально выраженного эффекта разрушения.

Пример снимка вертикального сечения на расстоянии 50 мм от боковой стенки после двухсот секунд ультразвукового воздействия для воды приведен на рисунке 1.3 в правом нижнем углу. Фотографии повреждений фольги в вертикальных сечениях, расположенных на различных расстояниях от боковой стенки реактора, после продолжительного ультразвукового воздействия для дистиллированной воды, представлены на рисунке 1.7б.

Фотографии, полученные описанным выше способом, обрабатывались с помощью программы, написанной на языке Python, схема которой представлен на

рисунке 1.5. На первом этапе программа создает массив из полученных в экспери-

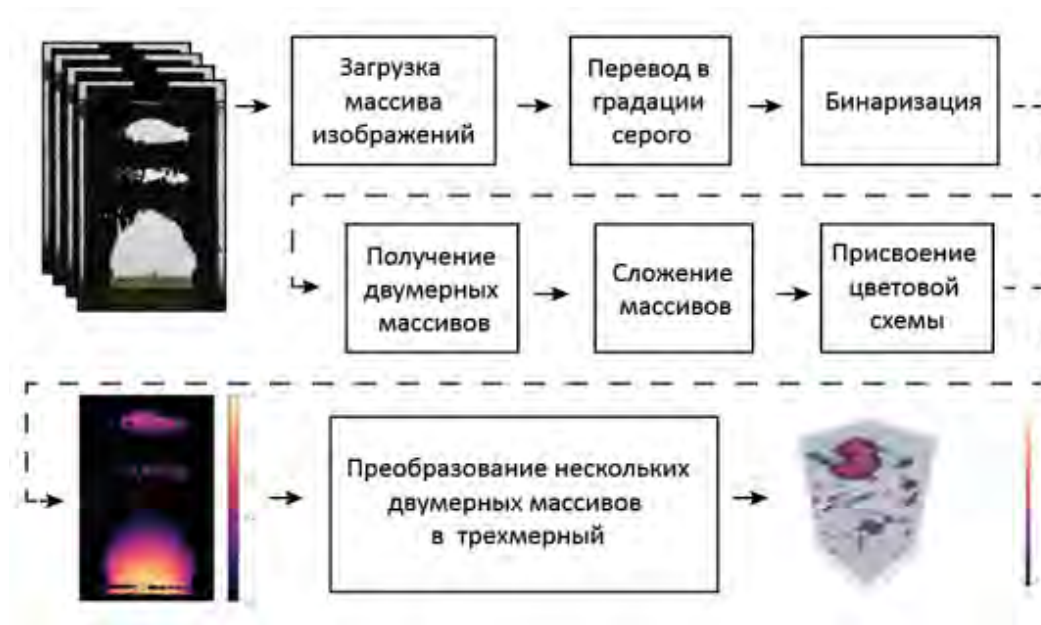


Рисунок 1.5 — Схема визуализации экспериментальных данных: преобразование двумерной тепловой карты повреждений фольги в трёхмерное представление пространственно-временной динамики кавитационных событий

менте фотографий, затем происходит конвертация изображений в оттенки серого. Полученные изображения в градациях серого переводятся в двухцветные черно-белые (процесс бинаризации). В результате обработки формируется двумерный массив данных, где границы эрозионных повреждений фольги определяются по интенсивности света в каждой точке изображения. После этого применяется операция сложения матриц с использованием библиотеки NumPy: точка с большим числовым значением обозначает более раннее время разрушения, а нулевое значение соответствует отсутствию эрозии фольги.

Последним этапом двумерной обработки было присвоение цвета каждой точке матрицы, в этом случае минимальному значению присваивался черный цвет (за время воздействия область не разрушилась), а максимальному - желтый цвет (область разрушилась сразу после включения ультразвука). В результате такой обработки для одного сечения получалась тепловая карта, цветовая схема которой позволяет отслеживать динамику разрушения фольги.

На основе построенной тепловой карты рассчитывалась зависимость относительной площади разрушения PD от времени в соответствии с формулой 1.6, предложенной в работе Sahoo et al. [74].

Дальнейшая обработка включала трёхмерное картирование всего объёма сонохимического реактора на основе серии двумерных тепловых карт, для чего проводились дополнительные эксперименты с перемещением рамки с фольгой вдоль оси x (от боковой стенки) с шагом 10 мм и последующей съёмкой в zy – плоскостях в течение установленных временных интервалов (1500 и 300 с).

Для каждого сечения получался набор из 300 кадров, на основе которых строилась тепловая карта. После этого происходила замена жидкости на идентичную, рамка смещалась на 10 мм вдоль оси x относительно предыдущего сечения и повторно производилась съёмка. В результате получался набор двумерных тепловых карт, который затем с использованием интерполяции кубическими сплайнами преобразовывался в трехмерную карту по алгоритму, представленному на рисунке 1.5.

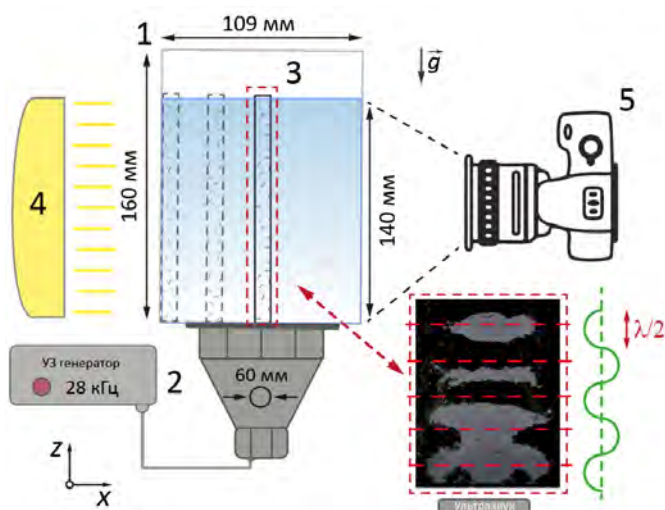


Рисунок 1.6 — Схема установки: 1) кювета $109 \times 109 \times 160 \text{ мм}^3$ (глубина $\times$ ширина $\times$ высота); 2) источник ультразвука 28 кГц; 3) пластиковая рамка $102 \times 152 \text{ мм}^2$ (ширина $\times$ высота) с фольгой толщиной 10 $\mu\text{м}$; 4) источник света на основе IPS матрицы; 5) камера Nikon d7200

Для исследования кавитационной активности в водных растворах ПАВ SDS экспериментальная установка (Рис. 1.6) была модифицирована. Ключевой модификацией конструкции стало применение кварцевого стекла (толщиной 4 мм)

вместо акрилового для изготовления стенок сонохимического реактора. Данное изменение было обусловлено адсорбцией додецилсульфата натрия (SDS) на поверхности акрила, что существенно осложняет очистку реактора и влияет на воспроизводимость результатов экспериментов. Кювета имела форму параллелепипеда с внутренними размерами $109 \times 109 \times 160 \text{ мм}^3$ (глубина $\times$ ширина $\times$ высота) (Рис. 1.6, 1). Особенностью конструкции также являлось комбинированное исполнение нижней грани: она была выполнена из акрила толщиной 15 мм, что обеспечивало необходимую механическую прочность, при этом в ее центральной части, через резиновую прокладку толщиной 8 мм, прикреплялся ультразвуковой излучатель. Источник ультразвуковых колебаний также состоял из диска из нержавеющей стали диаметром 95 мм и толщиной 0.5 мм (Рис. 1.6, 2), в центре которого был закреплен преобразователь Ланжевена с частотой 28 кГц и мощностью 32 Вт (Рис. 1.6, 2).

1.4 Результаты экспериментов в дистиллированной воде

В экспериментах с водой при высоте слоя жидкости $h_{liquid} = 160 \text{ мм}$ и длине ультразвуковой волны $\lambda \approx 53 \text{ мм}$ (см. главу 1.1.2) наблюдалось 6 областей повышенного давления, что соответствует трём длинам волн. Поскольку ультразвук в данном случае создаёт условия, необходимые для возникновения механической кавитации, в жидкости формируются кавитационные пузырьки. Эти пузырьки под влиянием сил Бьеркнеса могут притягиваться друг к другу, коалесцировать и, в зависимости от размера, дрейфовать в направлении узлов или пучностей стоячей волны [75]. Пузырьки резонансного размера перемещаются в пучности стоячей волны, и могут коллапсировать, вызывая образование микроструй. Если в жидкости имеется гидрофильная твердая поверхность [46], образующаяся микроструя направлена к этой поверхности, что приводит к её эрозии.

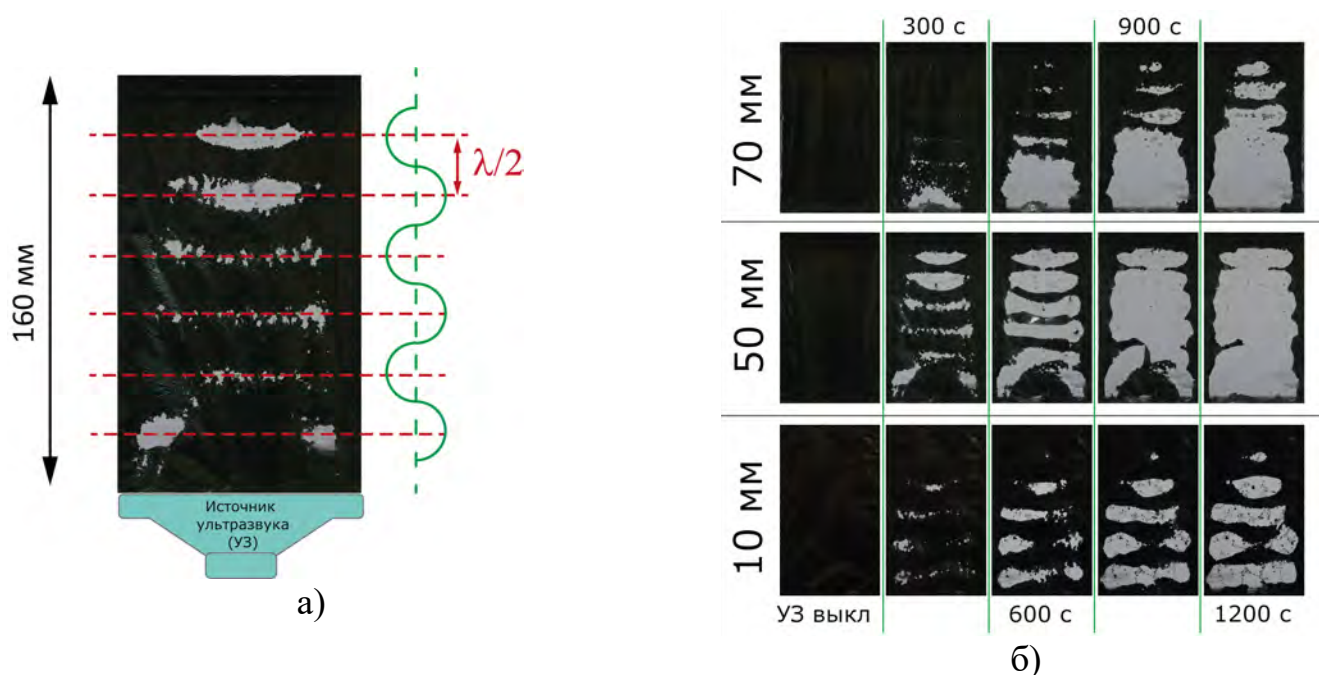


Рисунок 1.7 — (а) – Область съемки (с указанием характерных повреждений, возникающих в пучностях ультразвуковой волны $\lambda/2 = 25$ мм, $f = 28$ кГц) после 300 с ультразвукового воздействия; (б) – Серия фотографий, полученных в ходе эксперимента с водой (H_2O) на расстояниях 10, 50 и 70 мм от боковой стенки кюветы

На рисунке 1.7а представлена фотография разрушения фольги после 300 секунд ультразвукового воздействия, для среза, расположенного в центральной части реактора. Как и следовало ожидать, наблюдается формирование шести зон разрушения, расстояние между которыми составляет $\lambda/2 = 25$ мм.

На рисунке 1.7б представлены серии кадров для трех сечений, расположенных на расстояниях $x = 10, 50$ и 70 мм от боковой стенки реактора. Верхний ряд снимков соответствует вертикальному сечению, расположенному на расстоянии $x = 70$ мм от боковой стенки реактора. (см. рисунок 1.3) Следующий ряд иллюстрирует центральную зону, находящуюся на расстоянии $x = 50$ мм от боковой стенки, а нижний ряд - сечение, расположенное непосредственно у стенки реактора на расстоянии $x = 10$ мм. Видно, что через 20 минут (1200 секунд) ультразвукового воздействия, максимальная площадь разрушения фиксируется в центральной зоне реактора (50 мм). По мере приближения к боковой стенке, как и следовало ожидать, интенсивность разрушений заметно снижается. Такое

поведение связано с коническим расширением ультразвукового поля, создаваемого плоским ультразвуковым излучателем (см. например раздел 1.1.1). Амплитуда давления уменьшается пропорционально расстоянию от излучателя, что отражается на интенсивности разрушения фольги в зависимости от ее расположения в реакторе.

На следующем этапе полученные экспериментальные данные обрабатывались с использованием программы, схема которой описана в разделе 1.2. На

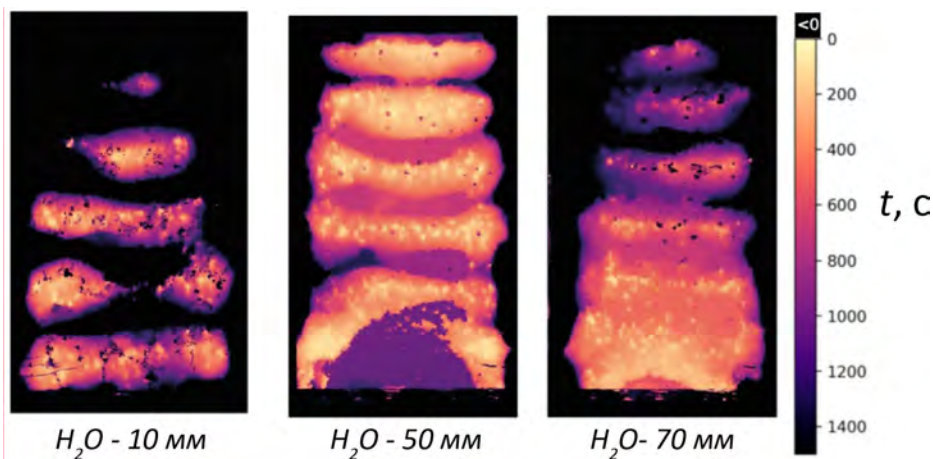


Рисунок 1.8 — Тепловые карты разрушения фольги через 1500 секунд (25 мин) ультразвукового воздействия для различных расстояний ($x = 10, 50, 70$ мм) от боковой стенки сонохимического реактора

рисунке 1.8 представлены результаты трех серий экспериментов, в которых проанализирована активность кавитационных событий в зависимости от расположения рамки с фольгой в сонохимическом реакторе. Как видно, активность кавитационных событий в объеме жидкости распределена неравномерно: в центральной области (на расстоянии 50 мм от стенки) наблюдается более быстрое разрушение фольги (Рис. 1.8) в сравнении с периферийными областями. Уже через 200 секунд ультразвукового воздействия в центральной области реактора на поверхности фольги формируется шесть зон активной кавитации, то есть возникает шесть областей, являющихся пучностями стоячей волны. При удалении от центральной области, наблюдается снижение интенсивности кавитационных событий вблизи границы раздела вода-воздух, об этом свидетельствует фиолетовый цвет на тепловых картах для 10 и 70 мм.

Из представленных на рисунке 1.9 данных следует, что в центральной области сонохимического реактора наблюдается существенное превышение (в 3.5 раза) относительной площади разрушения по сравнению с фольгой, размещенной на расстоянии 10 мм от стенки реактора. Временная динамика эрозии фольги позволяет по наклону графика определять скорость разрушения фольги. Скорость разрушения фольги в центральной области ($x = 50$ мм) оказывается равна $v = 0.039\text{ \%}/\text{с}$ (Рис. 1.9). По мере приближения к боковой стенке скорость уменьшается: на расстоянии $x = 70$ мм она составляет $v = 0.022\text{ \%}/\text{с}$, а на $x = 10$ мм - $v = 0.013\text{ \%}/\text{с}$. Скорость разрушения фольги вблизи стенки ($x = 10$ мм) оказывается в три раза меньше, чем вблизи центра реактора ($x = 50$ мм).

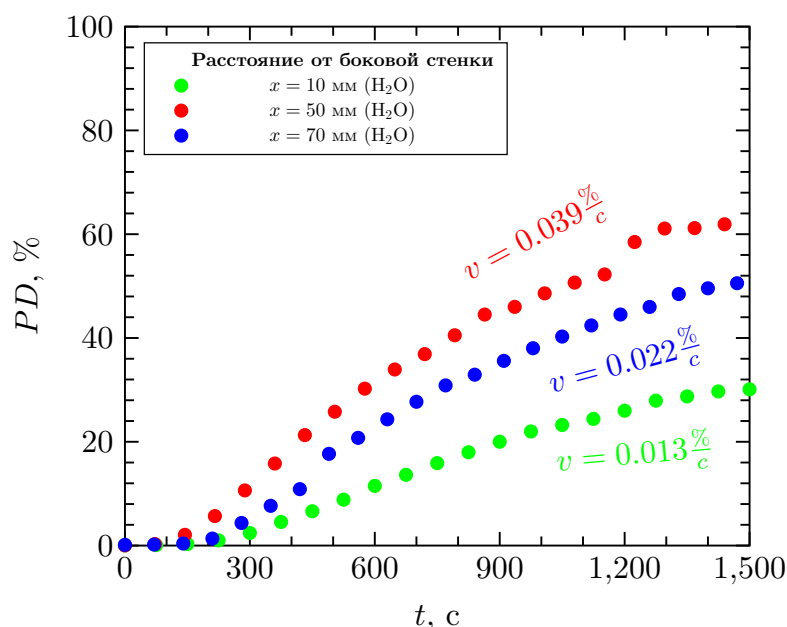


Рисунок 1.9 — Зависимость относительной площади разрушения фольги от времени для различных расстояний ($x = 10, 50, 70$ мм) от боковой стенки

На рисунке 1.10 представлена трехмерная тепловая карта кавитационной активности, полученная с использованием пространственных сечений, демонстрирующих активность кавитационных событий в объеме. Видно, что максимальная скорость эрозии поверхности наблюдается в нижней половине объема реактора вблизи источника ультразвука.

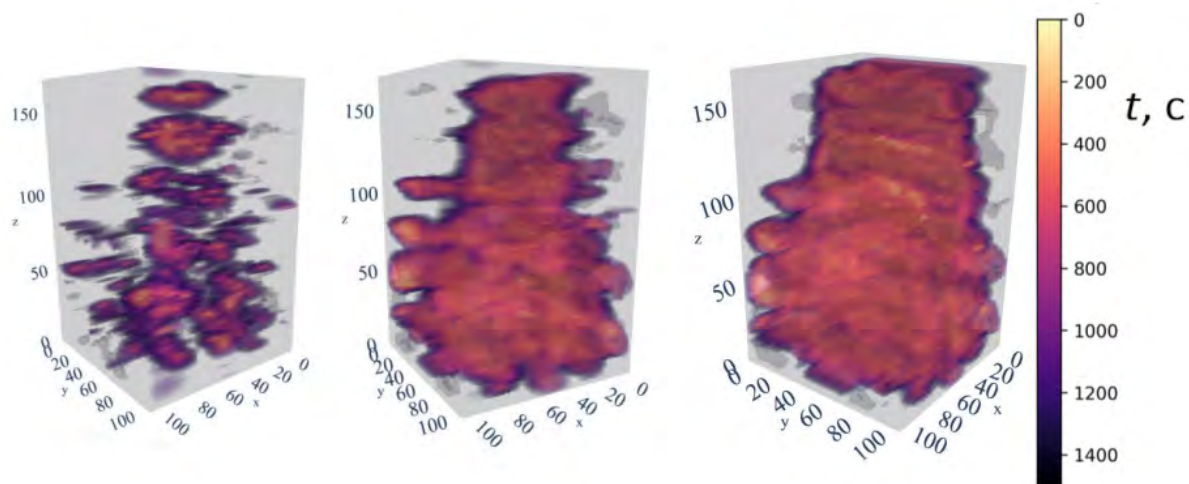


Рисунок 1.10 — Трехмерные тепловые карты активности кавитационных событий

1.5 Результаты экспериментов с водными растворами соли NaCl

Аналогичные эксперименты были выполнены для водных растворов NaCl в диапазоне концентраций 0.1 – 5.5 ммоль/л при длительности ультразвукового воздействия 300 с. На рисунке 1.11 приведены тепловые карты разрушенной поверхности фольги после $t = 300$ с ультразвукового воздействия, полученные для различных концентраций соли. Для сравнения на рисунке 1.11а приведена тепловая карта, полученная для дистиллированной воды в отсутствие соли.

Как видно из сравнения рисунков 1.11а и 1.11б, при низкой концентрации соли $C_1 = 0.3$ моль/л расположение зон кавитационной активности качественно совпадает с их расположением в чистой воде (наблюдается лишь небольшое смещение в вертикальном направлении, связанное с изменением скорости звука), однако сами зоны становятся более протяженными в горизонтальном направлении. Во всех зонах, за исключением верхней, фольга начинает разрушаться позже, чем в дистиллированной воде, что показывает наличие преимущественно фиолетового цвета на тепловых картах. Верхняя зона, как и в случае с дистиллированной водой, начинает разрушаться первой, но в присутствии соли ее площадь значительно больше. Более интенсивное разрушение поверхности фольги вблизи свободной границы при добавлении соли связано с тем, что плотность раствора и скорость звука в жидкости увеличиваются [76]. При концентрации 0.3 моль/л ско-

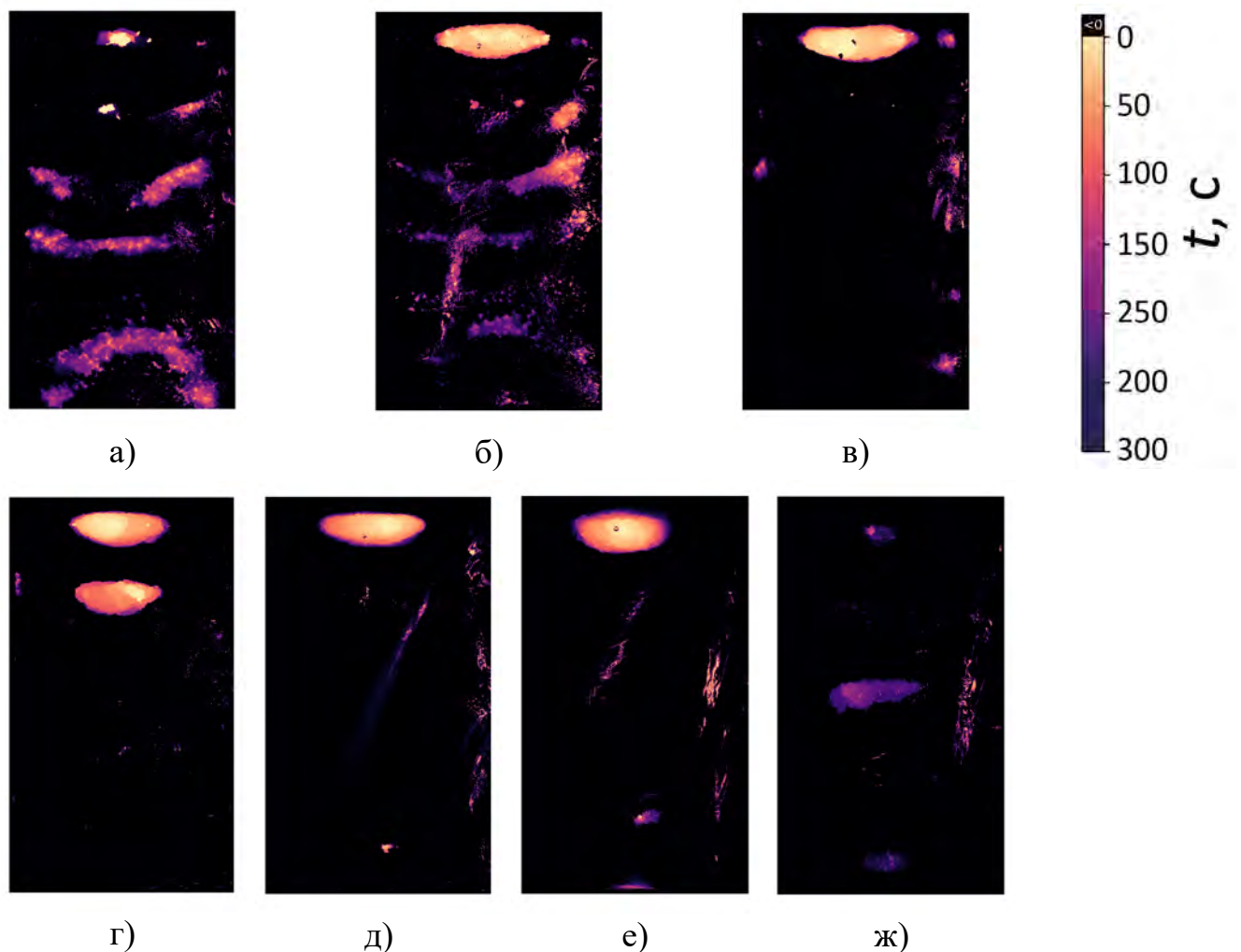


Рисунок 1.11 — Тепловые карты, иллюстрирующие зоны кавитационной активности в растворах, для различных концентраций соли: (а) - H_2O ; (б) - 0.3 моль/л NaCl ; (в) - 0.6 моль/л NaCl ; (г) - 1.0 моль/л NaCl ; (д) - 1.5 моль/л NaCl ; (е) - 3.0 моль/л NaCl ; (ж) - 5.5 моль/л NaCl

рость звука составляет 1498 м/с, а плотность - 1.012 г/см^3 . При концентрации соли 0.3 моль/л скорость звука достигает 1498 м/с, что на 1.2% выше, чем в дистиллированной воде (1480 м/с), а плотность раствора составляет 1.012 г/см^3 против 0.998 г/см^3 для воды [77]. В результате, это приводит к незначительному изменению скорости звука и, как следствие, к небольшому сдвигу формирующейся стоячей волны по сравнению со случаем чистой воды.

Добавление хлорида натрия (NaCl) в воду снижает растворимость газов (кислорода, азота) в растворе. Это вызывает перенасыщение раствора газом и смещение термодинамического равновесия в сторону выделения газовой фазы, что способствует образованию стабильных пузырьковых зародышей. При ультразвуку-

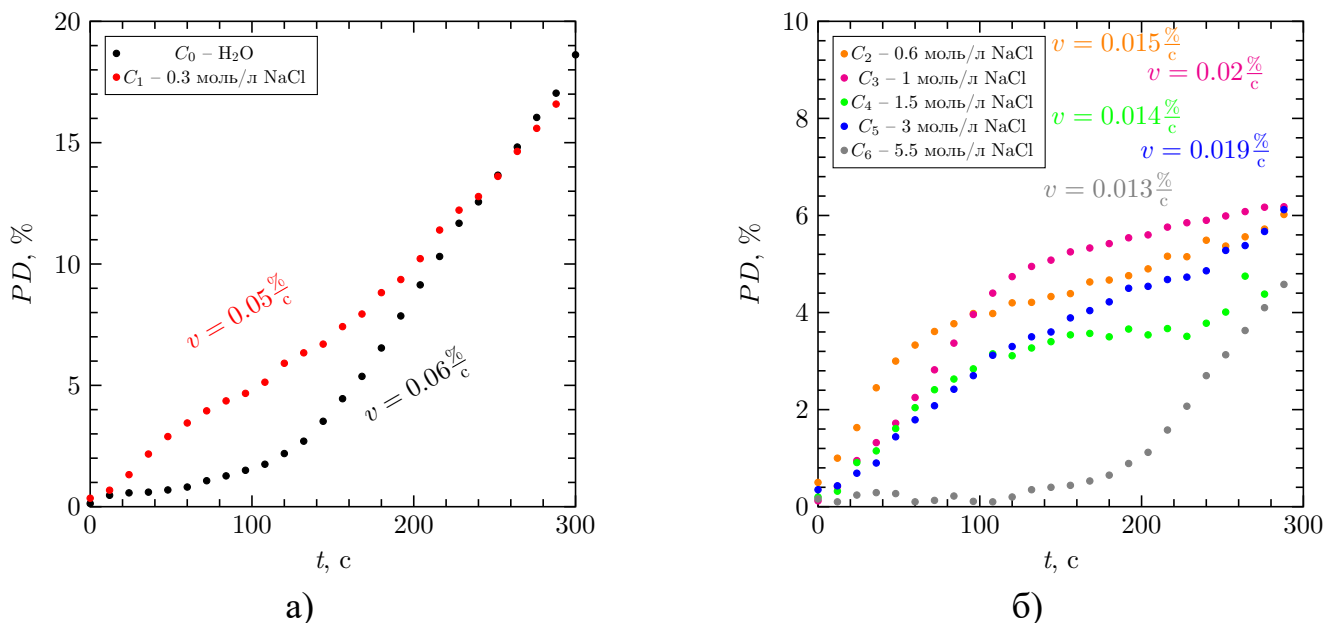


Рисунок 1.12 — Временная динамика разрушений поверхности фольги для: (а) - H_2O и 0.3 моль/л NaCl ; (б) - 0.6 моль/л NaCl ; 1.0 моль/л NaCl ; 3.0 моль/л NaCl ; 5.5 моль/л NaCl

ковом воздействии данные факторы приводят как к росту числа кавитационных событий, так и расширению зон активной кавитации [78]. Кавитационный процесс, как известно, зарождается на микроскопических газовых пузырьках или различных неоднородностях среды, выступающих в роли центров кавитации. К таким неоднородностям относятся взвешенные твердые частицы, поверхностные дефекты и границы раздела фаз. Особенно интенсивно этот процесс протекает в приграничных слоях (в данном случае граница раздела раствор-воздух), где, как показывают исследования [79], наблюдается повышенная концентрация ядер нуклеации в сочетании с увеличенной газонасыщенностью среды. Такое сочетание факторов создает оптимальные условия для стабилизации и последующего роста кавитационных пузырей.

Проявление этого эффекта можно увидеть на рисунках 1.11в - 1.11е, где видно, что при достижении определенной концентрации соли повреждения в центре отсутствуют, а эрозия в большей степени происходит по краям. В верхней части реактора образуется только одна зона - это связано с вышеупомянутым явлением, а также с увеличением количества пузырьков, которые со временем достигают резонансных размеров. Интерференция ультразвуковых волн также

играет определенную роль, особенно вблизи границы раздела. Сочетание этих факторов приводит к тому, что зона кавитации в этой области становится более выраженной.

При концентрации, близкой к насыщению ($C_6 = 5.5$ моль/л, $\rho = 1.19$ г/см³), наблюдается картина разрушений (Рис. 1.11ж), симметричная относительно центральной части сечения. Участки окрашены в фиолетовый цвет, что свидетельствует о значительно более позднем начале эрозии фольги: разрушение при данной концентрации начинается после 200 с, в то время как при низких концентрациях соли его фиксируют уже на 15 с. Вероятной причиной этого также является изменение кинетики образования пузырьков под действием высокой концентрации NaCl, которое препятствует формированию у поверхности пузырьков, способных к коллапсу.

Скорость разрушения фольги также зависит от концентрации соли. При низкой концентрации C_1 эрозия фольги на начальном этапе эксперимента происходит быстрее, чем в дистиллированной воде. Однако спустя 300 с площадь разрушенной поверхности оказывается сравнимой с PD в дистиллированной воде; при C_1 изгиб кривой изменяется, зависимость принимает практически линейный характер.

При концентрации соли $C_2 = 0.6$ моль/л на протяжении первых 60 секунд происходит наиболее быстрое разрушение фольги, однако по окончании эксперимента площадь разрушенной поверхности оказывается такой же, как площадь в случаях $C_3 = 1$ моль/л, $C_5 = 3.0$ моль/л. При концентрации C_6 , близкой к насыщению, меняется изгиб кривой $PD(t)$: эрозия начинает происходить на более позднем этапе эксперимента, что подтверждают тепловые карты.

Как показали эксперименты, при увеличении концентрации NaCl в жидкости происходит изменение формы, площади разрушенной поверхности фольги и количества зон кавитационной активности, вызванное изменениями плотности жидкости, скорости звука и, соответственно, импеданса. Кроме того, в верхней части реактора возникает область активного разрушения, вызванного интерференцией ультразвуковых волн вблизи границы раздела сред.

1.6 Результаты экспериментов с водными растворами ПАВ SDS

Изменение геометрических параметров кюветы, а также замена материала стенок на кварцевое стекло, обусловленные особенностями работы с поверхностно-активными веществами (ПАВ), потребовали повторного измерения эталонных характеристик в дистиллированной воде.

В экспериментах с водными растворами ПАВ (SDS) высота слоя жидкости составляла $h_{liquid} = 140$ мм. В дистиллированной воде в этом случае наблюдалось пять четко выраженных зон разрушения фольги (Рис. 1.13), пространственное распределение которых соответствует положению пучностей стоячей ультразвуковой волны: при частоте 28 кГц и скорости звука $c \approx 1480$ м/с длина волны составляет $\lambda = c/f \approx 50$ мм, что создает условия для формирования 5 областей максимумов акустического давления при данной высоте жидкости.

На рисунке 1.13 представлены тепловые карты, показывающие временную динамику разрушений фольги для вертикальных срезов реактора на расстояниях $x = 50$ мм, $x = 30$ мм, $x = 10$ мм, от боковой стенки через $t = 300$ с ультразвукового воздействия. Как отмечалось в разделе 1.3, желтый цвет на тепловых картах соответствует зонам максимальной кавитационной активности, где разрушение фольги начинается непосредственно после включения ультразвукового излучателя. Изменение цвета на тепловой карте, соответствующее приведенной рядом цветовой шкале, отражает динамику разрушения фольги во времени, позволяя точно определять момент возникновения повреждений. Фиолетовый цвет соответствует областям, которые подверглись разрушению после $t = 200$ с ультразвукового воздействия, а черный - областям неразрушенной поверхности фольги. Более подробное описание методики обработки изображения можно найти в разделе 1.3. Для сравнения на том же рисунке приведены результаты численного моделирования, выполненного И.О. Сбоевым (Рис. 1.13) с использованием методики, описанной в работе [80]. Для наглядного сравнения в верхней части рисунка, помимо распределения кавитационной активности и результатов

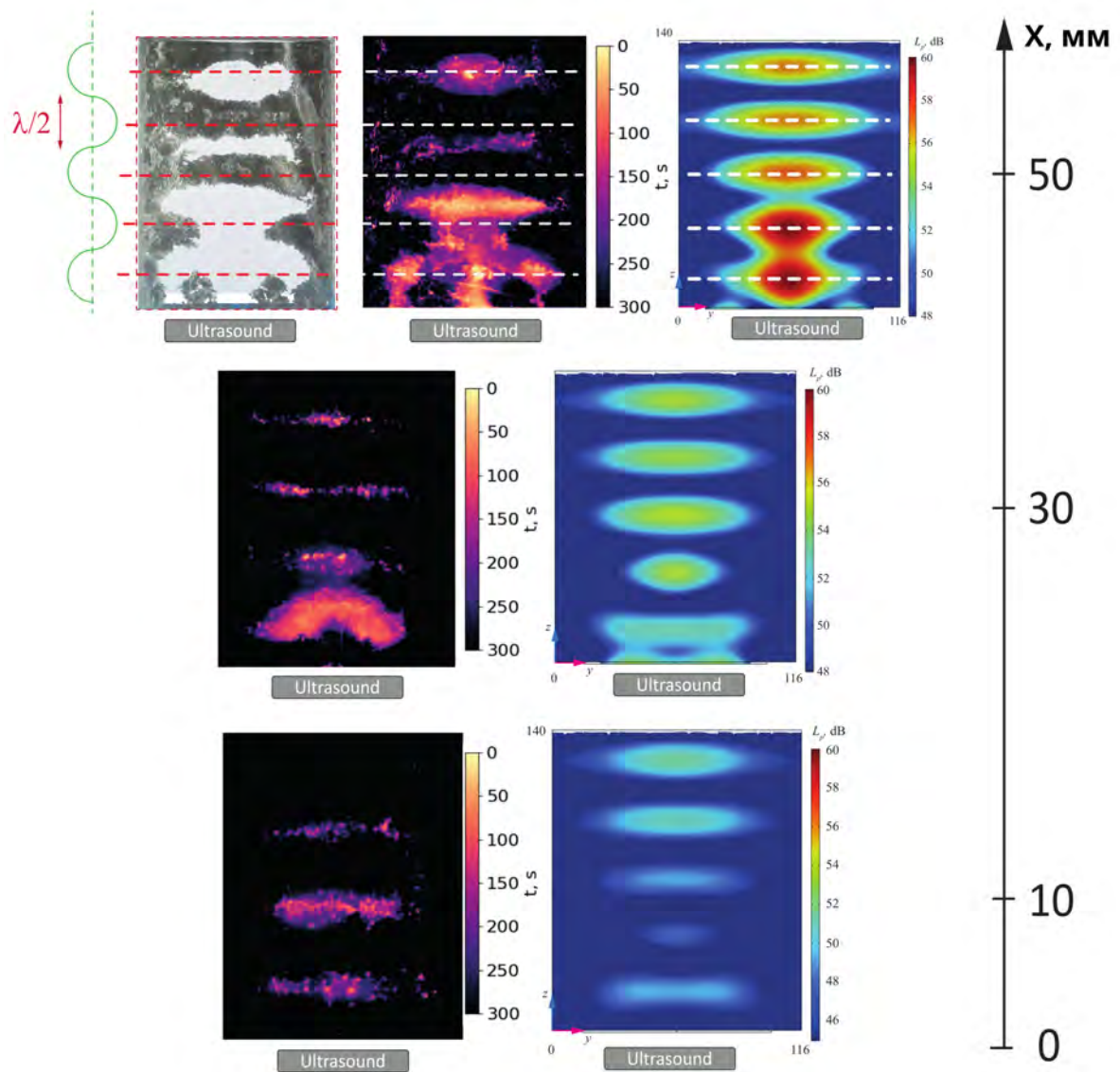


Рисунок 1.13 — В верхней части рисунка представлена фотография фольги, находящейся на расстоянии $x = 50$ мм от боковой стенки спустя 300 с обработки ультразвуком. Схема распространения волны, тепловая карта и двумерное изображение, полученное в результате численного счета, иллюстрируют связь распределения звукового давления и зон активной кавитации. Ниже сопоставлены фотографии разрушившейся фольги, результаты численного эксперимента [80] и тепловые карты для срезов $x = 30$ мм, $x = 10$ мм

численного моделирования, представлены данные классического теста фольгой. В центральной области $x = 50$ мм (Рис. 1.13) наблюдается 5 зон разрушения фольги, соответствующих областям активной кавитации. Распространение ультразвука на малом расстоянии от плоского акустического излучателя изначально сосредоточено в цилиндрическом объеме (см. раздел 1.1.1), поэтому вблизи источника формируется область разрушения фольги в форме полукольца.

При приближении к боковой стенке $x = 30$ мм (Рис. 1.13) области разрушения существенно сокращаются как по величине площади, так и по пространственной протяженности относительно центральной области. Кроме этого, разрушение в срезе $x = 30$ мм начинается после $t = 60$ с воздействия ультразвука, в центральной же области разрушение поверхности начинается сразу в момент включения излучателя.

В пристеночной области $x = 10$ мм (Рис. 1.13) наблюдается уменьшение интенсивности разрушений ввиду удаления от источника ультразвука, поэтому количество зон кавитационной активности уменьшается до трех. Момент начала разрушения соответствует $t = 100$ с ультразвуковой обработки (позже чем в вертикальных срезах на расстояниях $x = 50$ мм и $x = 30$ мм от боковой стенки).

В центральной области фольга разрушается быстрее всего, о чем свидетельствует наклон линии графика PD относительной площади разрушения от времени. Суммарная PD через 300 с эксперимента для среза $x = 50$ мм оказывается равной 38%. Данное значение в 2 раза больше, чем PD на расстоянии $x = 30$ мм от боковой стенки, в 3 раза больше, чем для $x = 10$ мм.

На рисунке 1.15а представлена трехмерная тепловая карта кавитационной активности, полученная с использованием результатов для набора вертикальных сечений. Она позволяет рассмотреть временную динамику разрушения фольги в объеме сонохимического реактора. Видно, что максимальная скорость разрушения фольги наблюдается в нижней половине объема реактора вблизи источника ультразвука; в центральной (по горизонтали) области разрушение происходит быстрее, чем вблизи боковых стенок. Зоны активной кавитации вытянуты в на-

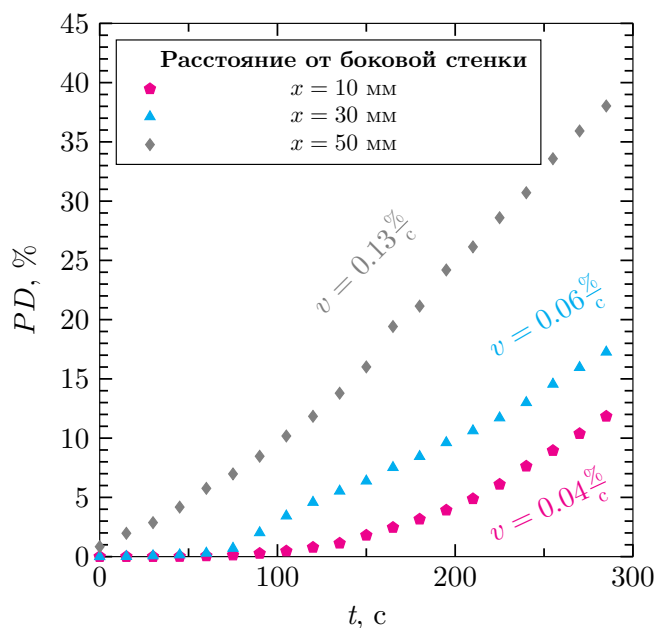


Рисунок 1.14 — Зависимости относительной площади разрушения фольги от времени для трех вертикальных срезов, расположенных на расстояниях $x = 10$ мм, $x = 30$ мм, $x = 50$ мм от боковой стенки для дистиллированной воды

правлении, перпендикулярном направлению распространения волны и на одной и той же высоте вне зависимости от расстояния до боковой стенки.

Полученная в экспериментах трехмерная тепловая карта кавитационной активности (Рис. 1.15а), сравнивалась с результатами численных расчетов, представленными на рисунке 1.15б и показывающими распределение звукового давления внутри сонохимического реактора. Сопоставление результатов численного моделирования и натурного эксперимента демонстрирует наличие корреляции между областями разрушений, наблюдаемыми в эксперименте и распределениями звукового давления, полученными численно.

Далее была проведена серия экспериментов для растворов с концентрацией SDS, равной $C_1 = 1$ ммол/л (Рис. 1.16). Эксперименты показали, что добавление SDS уменьшает количество и площадь зон активной кавитации. Такое поведение связано с явлением ингибирования коалесценции в присутствии анионного ПАВ [81; 82]. Как и в случае с NaCl, добавление SDS [83; 84] приводит к упрощению нуклеации кавитационных пузырьков, поскольку в жидкости образуется больше неоднородностей и дефектов, которые в основном сосредоточены вблизи границ раздела. Одним из этапов, приводящих к кол-

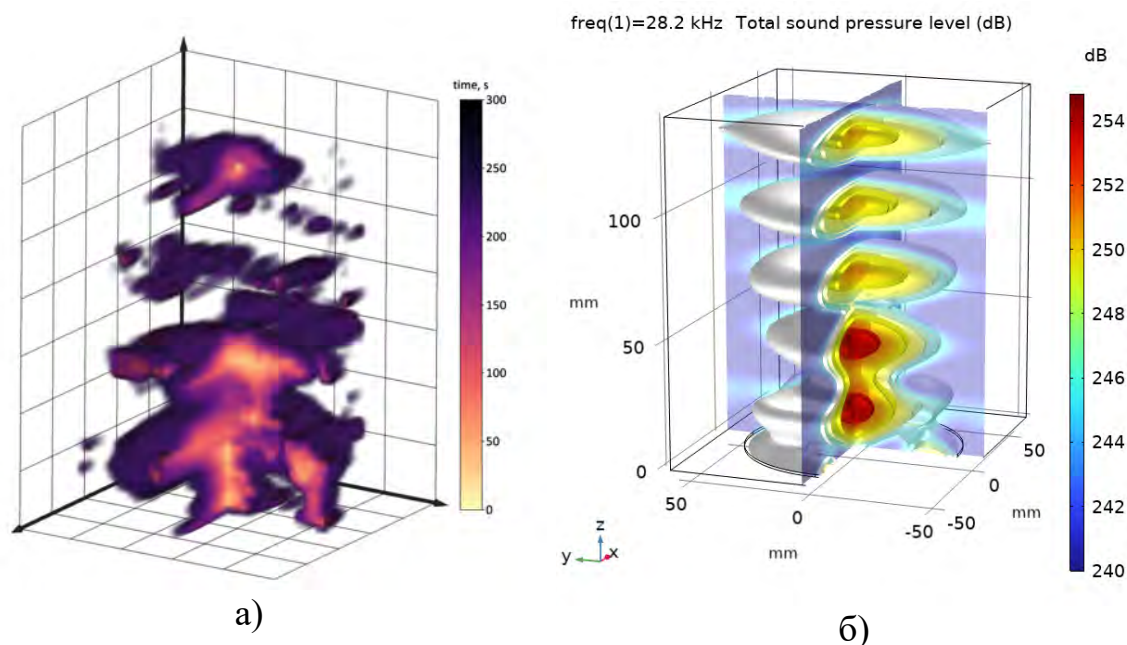


Рисунок 1.15 — (a) - Трехмерная тепловая карта активности кавитационных событий в сонохимическом реакторе, наполненном дистиллированной водой; (b) - Полученные в трехмерных численных расчетах изоповерхности уровня звукового давления L_p (45, 50, 52, 54 дБ) при $f = 28.2$ кГц и их проекции на вертикальные плоскости в центре полости

лапсу кавитационных пузырьков, является их рост посредством коалесценции и ректификационной диффузии. Однако при наличии в растворе молекул ПАВ, покрывающих оболочку пузырьков, этот процесс замедляется, и пузырьки позже достигают резонансного размера, что изменяет структуру распределения кавитационной активности. Основными причинами снижения интенсивности кавитации под действием SDS считают образование более мелких пузырьков (из-за ингибирования коалесценции электростатическим отталкиванием) и уменьшение механического повреждения поверхности [83]. Однако в некоторых случаях формируемые в присутствии ПАВ пузырьковые кластеры могут, напротив, усиливать кавитационную активность [84].

На рисунке 1.16 приведены результаты экспериментов в растворах с концентрацией $C_2 = 2$ ммол/л. Как видно, при увеличении концентрации SDS увеличивается площадь зон активной кавитации, возрастает скорость разрушения в центральной (по горизонтали) области $x = 50$ мм.

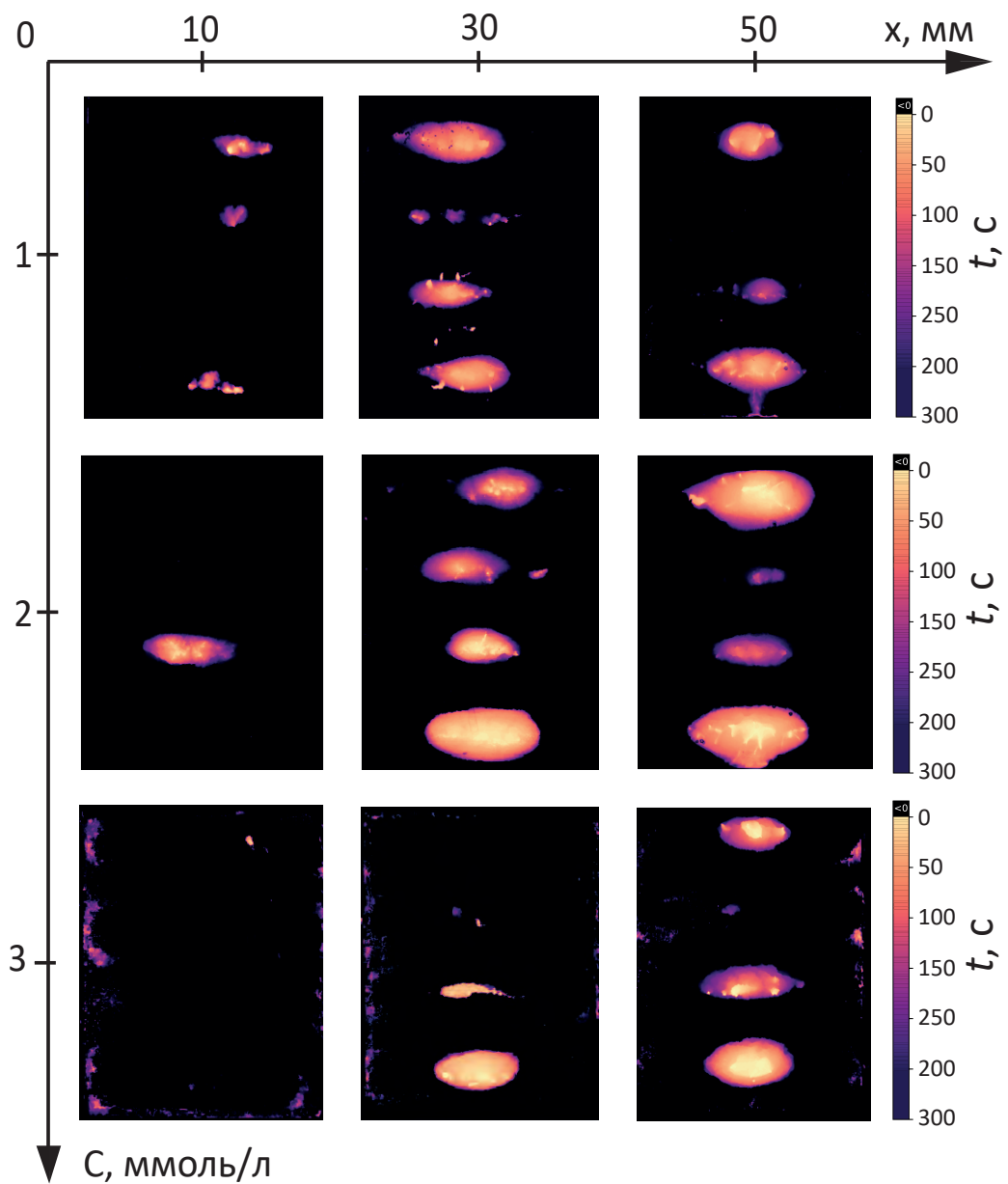


Рисунок 1.16 — Тепловые карты, иллюстрирующие зоны кавитационной активности для водных растворов с концентрациями SDS $C = 1 \div 3$ ммоль/л на различных расстояниях от боковой стенки

В экспериментах с концентрацией $C_3 = 3$ ммол/л наблюдалось существенное изменение в структуре распределения кавитационной активности. В отличие от экспериментов с меньшими концентрациями SDS наблюдается эрозия фольги по периметру - вблизи твердых стенок кюветы (Рис. 1.16). Данное явление связано с тем, что при добавлении ПАВ пузырьки становятся менее стабильными и не могут достигнуть резонансного размера, поэтому количество зон активной кавитации уменьшается. Стабильность в таких условиях достигается только вблизи границ раздела (например, стенок кюветы), чем обусловлено разрушение фольги по краям наблюдаемой области [79].

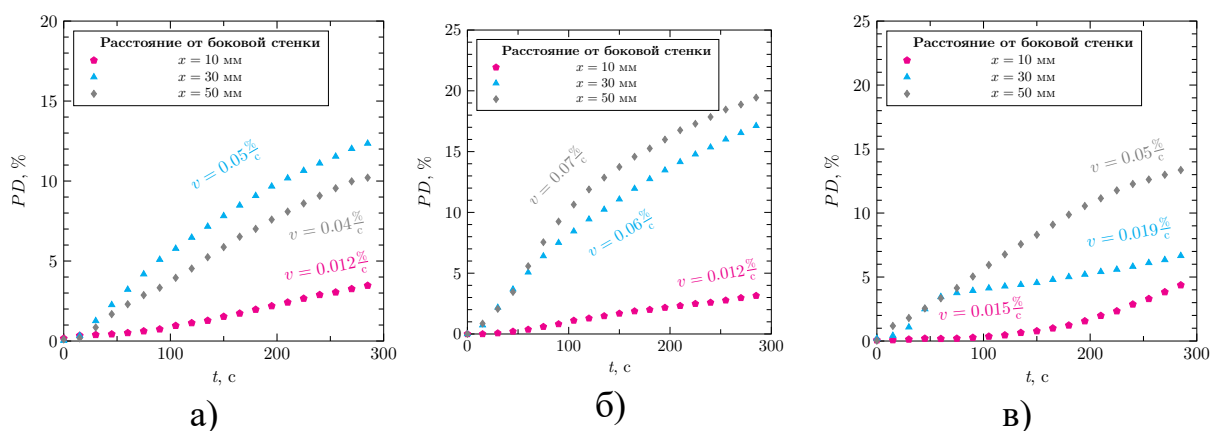


Рисунок 1.17 — Зависимости относительной площади разрушения фольги от времени для трех вертикальных срезов, расположенных на расстояниях $x = 10$ мм, $x = 30$ мм, $x = 50$ мм от боковой стенки, при концентрациях SDS (а) - $C_1 = 1$ ммол/л; (б) - $C_2 = 2$ ммол/л; (в) - $C_3 = 3$ ммол/л

Зависимости относительной площади разрушения от времени ($PD(t)$) для растворов с различными концентрациями SDS показали, что добавление ПАВ приводит к снижению площади разрушения ≈ 3 раза (Рис. 1.17). Для растворов с концентрациями C_2, C_3 более активное разрушение фольги происходит не в вертикальном срезе реактора, расположенном на расстоянии $x = 50$ мм от боковой стенки, а на расстоянии $x = 30$ мм. Кроме того, изменяется кривизна линии зависимости $PD(t)$: разрушение фольги в присутствии ПАВ начинается раньше, однако количественно оказывается меньше и происходит медленнее, чем для дистиллированной воды. Такое поведение может быть связано с влиянием ПАВ на

процесс коалесценции кавитационных пузырьков и, как следствие, на их размеры [8].

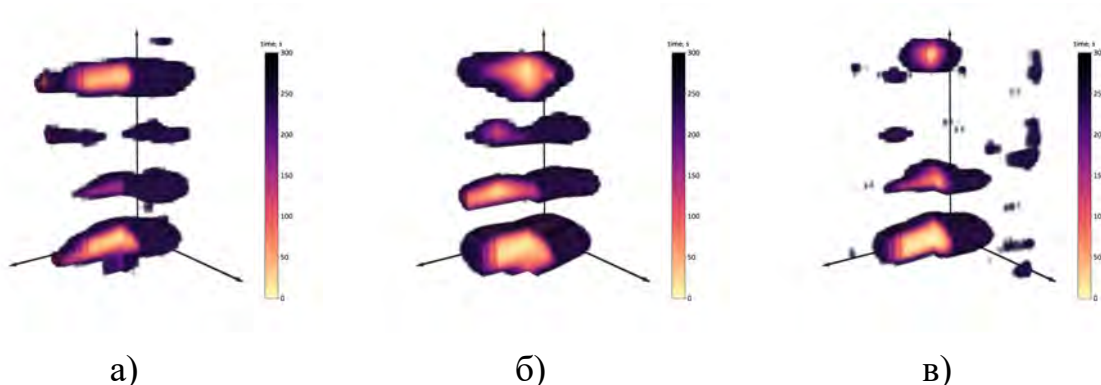


Рисунок 1.18 — Трехмерная тепловая карта активности кавитационных событий в сонохимическом реакторе, наполненном раствором SDS с концентрацией (а) - $C_1 = 1$ ммол/л; (б) - $C_2 = 2$ ммол/л; (в) - $C_3 = 3$ ммол/л

На рисунке 1.18 показаны результаты трехмерного картирования кавитационной активности в сонохимическом реакторе с растворами SDS. Добавление ПАВ приводит к уменьшению поверхностного натяжения жидкости, что в свою очередь способствует формированию кавитационных пузырьков (он становится менее энергетически затратным) [82; 85]. В связи с тем, что кавитационные пузырьки образуются в этом случае быстрее, чем в дистиллированной воде, разрушение фольги начинается раньше. Об этом свидетельствует изгиб графика $PD(t)$ (Рис. 1.14, 1.17) и желтый цвет на тепловых картах (Рис. 1.15, 1.18). В то же время дальнейшее разрушение фольги происходит медленнее, чем в дистиллированной воде, ввиду влияния SDS на взаимодействие между пузырьками и их размеры.

В растворе с концентрацией C_3 разрушение происходит не только в центральной области $x = 50$ мм, но и по периметру, вблизи твердых стенок реактора. Это связано с влиянием больших концентраций ПАВ на стабильность кавитационных пузырьков, время их существования возрастает (см., например, [79]).

Еще одним отличием от случая дистиллированной воды является то, что в воде, помимо пяти основных зон, имеются небольшие области локального разрушения. В растворах же SDS такого поведения не наблюдается: разрушения, расположенные вне областей экстремумов акустического давления, отсутствуют.

Такое поведение может быть связано с взаимодействием SDS и оксидной пленки, покрывающей поверхность алюминиевой фольги [85]. В пучностях ультразвуковой волны коллапс пузырьков более интенсивный, поэтому он может разорвать слой ПАВ, покрывающий фольгу. В этих областях повреждения, вызванные схлопыванием пузырьков, накапливаются и приводят к эрозии фольги (см., например, [86]). В других местах коллапс происходит не так интенсивно (скорость, с которой микроструя движется к твердой поверхности оказывается меньше), локального разрушения не наблюдается [87—89].

1.7 Заключение по главе

Разработан метод исследования кавитационной активности, основанный на применении теста фольгой и тепловых карт и позволяющий в отличие от ранее существующих методов, регистрировать временную динамику и пространственное распределение активности кавитационных событий в объеме сонохимического реактора.

Сопоставление результатов экспериментов с дистиллированной водой с данными прямого численного моделирования, выполненного проведенного И.О. Сбоевым, выявило корреляцию между полями кавитационной активности и акустического давления. Это позволяет использовать картину активности кавитации для получения данных о распределении акустического давления в реакторе .

Экспериментально исследовано влияние соли NaCl и ПАВ SDS на активность кавитационных событий при ультразвуковом воздействии. Найдено, что повышение концентрации соли снижает скорость разрушения фольги, что связано с изменением физико-химических свойств жидкости — увеличением поверхностного натяжения и вязкости раствора.

Добавление ПАВ (SDS) ускоряет разрушение фольги, вызывая более раннее начало эрозии по сравнению с чистой водой. Этот эффект обусловлен снижением

поверхностного натяжения и увеличением количества кавитационных зародышей, что существенно понижает порог возникновения кавитации.

Практическая значимость работы заключается в разработке метода диагностики кавитационных процессов с помощью тепловых карт разрушения фольги, позволяющего получать данные о пространственном распределении и временной эволюции активности кавитационных событий и распределении звукового давления в светопроницаемых средах, в сонохимических реакторах. Данная методика может быть применена в химической и фармацевтической промышленности для оптимизации сонохимических реакторов, а также в горно-обогатительной промышленности для повышения эффективности флотационных процессов. Установленные закономерности влияния NaCl и SDS на кавитационную активность позволяют регулировать интенсивность кавитации.

ГЛАВА 2. ДИНАМИКА ПУЗЫРЬКОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА ВБЛИЗИ И НА ТВЕРДЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ С РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ СМАЧИВАЕМОСТИ

2.1 Введение

Настоящая глава посвящена экспериментальному исследованию динамики газовых пузырьков вблизи твердых поверхностей с различной степенью гидрофобности в ультразвуковом поле.

Взаимодействие газовых пузырьков с твердыми поверхностями при ультразвуковом воздействии представляет собой сложное явление, лежащее в основе многочисленных технологических процессов [18]. Интерес к этой области обусловлен ее ключевой ролью в сонохимии, ультразвуковой очистке, флотационном обогащении полезных ископаемых и микрофлюидных устройствах [18; 30; 50; 90—92]. Численные исследования [30; 31] подтверждают, что акустические вибрации могут существенно влиять на взаимодействие между пузырьками и минеральными частицами, повышая эффективность их закрепления.

Проведенные в рамках диссертационной работы предварительные эксперименты показали выраженную зависимость вероятности закрепления пузырьков от смачиваемости поверхности в условиях ультразвуковой дегазации водных растворов [7]. Было установлено, что для гидрофобной поверхности (тефлон) площадь, занимаемая закрепившимися пузырьками, существенно превышает таковую для гидрофильной (оргстекло), особенно в дегазированной жидкости. Эти наблюдения непосредственно указывают на ключевую роль краевого угла смачивания в процессах акустической фиксации пузырьков, они послужили основой для постановки задач настоящего исследования.

Ключевым параметром, определяющим характер взаимодействия пузырька с твердой поверхностью, является краевой угол смачивания [93]. Для его точного

измерения в системах «газ-жидкость-твёрдое тело» широко применяется метод плененного пузырька. Суть метода заключается в контакте газового пузырька с твёрдой поверхностью, полностью погружённой в жидкость, что позволяет имитировать условия, максимально приближенные к реальным технологическим процессам, таким как флотация [94]. Кроме того, метод плененного пузырька является предпочтительным для исследования характеристик гидрофильных поверхностей в сравнении с методом лежащей капли в воздухе [95; 96]. Главное преимущество заключается в том, что погружение поверхности в объем жидкости предотвращает активную адсорбцию молекул воды, органических паров и других загрязнений из окружающего воздуха на исследуемую поверхность.

Для анализа полученных изображений и определения краевого угла традиционно используются тангенциальные методы [97; 98], которые заключаются в построении касательной к границе раздела фаз в точке трехфазного контакта. Современные реализации этих методов автоматизируют их с помощью обработки изображений, точно определяя контур пузырька и вычисляя угол [99].

Формирование краевого угла и адгезия пузырька к твердой поверхности в значительной степени контролируются свойствами тонкой жидкой прослойки, возникающей между пузырьком и твёрдой поверхностью. В ситуации, когда силы, стабилизирующие эту прослойку, преобладают, пузырёк не входит в непосредственный контакт с твёрдым телом и не закрепляется на нём [100]. Согласно классическим представлениям, устойчивость жидкой прослойки описывается в рамках теории DLVO [101–103], которая рассматривает баланс между ван-дер-ваальсовыми силами притяжения и электростатическими силами отталкивания в двойном электрическом слое (EDL).

При наложении ультразвукового поля динамика системы существенно усложняется [92]. Поведение твёрдых, жидких и газовых включений в жидкости при акустическом воздействии определяется действием усреднённых по времени гидродинамических воздействий, известных как акустические силы радиационного давления (ARF - Acoustic radiation force). Эти силы подразделяют на два типа: первичные, вызывающие миграцию частиц и их концентрирование в

пучностях или узлах стоячих волн, и вторичные, обуславливающие взаимное притяжение или отталкивание частиц, а в некоторых случаях — формирование устойчивых кластеров [30].

В контексте межчастичного взаимодействия принято различать силы, действующие между различными типами включений. При описании взаимодействия газовых пузырьков возникают силы Бьеркнеса (Bjerknes force), названные в честь К.А. Бьеркнеса (С.А. Bjerknes) и его сына В.Ф.К. Бьеркнеса (V.F.K. Bjerknes), которые одними из первых обнаружили силы взаимодействия между двумя осциллирующими шарами в жидкости [104]. По аналогии, при взаимодействии твёрдых частиц вводят силы Кёнига (König forces). Рассуждения о физических причинах возникновения сил Бьеркнеса можно найти в монографии Жуковского [105].

Теория Бьеркнеса основана на следующих предположениях:

1. окружающая среда представляет собой идеальную несжимаемую жидкость;
2. газ внутри пузырьков подчиняется адиабатическому закону;
3. расстояние между пузырьками L значительно больше их радиусов R_e ($L \gg R_e$), так что отклонениями формы пузырьков от сферической и рассеянием волн более высокого порядка, чем первичные, можно пренебречь;
4. падающее поле достаточно слабое, поэтому нелинейными колебаниями можно пренебречь.

Теория Бьеркнеса согласуется с результатами экспериментов, проведенных при выполнении указанных выше условий [106]. Первичная сила Бьеркнеса [104] определяется как усредненная по времени сила, действующая на пузырь в первичном акустическом поле:

$$\vec{F}_{Bj1} = \langle V(t) \nabla P(\vec{r}, t) \rangle_T, \quad (2.1)$$

где скобки обозначают усреднение по акустическому периоду, $V(t)$ — объем пузырька, зависящий от времени, а P — акустическое давление, которое суще-

ствовало бы в жидкости в центре пузырька, если бы пузырек отсутствовал. При использовании уравнения Рэлея-Плессе [107] для описания связи между колебаниями давления и радиуса сферического пузырька, первичная сила Бьеркнеса приобретает следующий вид (см., например, [108]):

$$\vec{F}_{Bj_1} = -\frac{\pi k R_e (\tilde{p}_a)^2 \sin(2k\vec{x})}{\rho_L (\omega^2 - \omega_n^2)} \quad (2.2)$$

где $\tilde{p}_a$ — амплитуда звуковой волны, $\vec{x}$ — направление распространения волны, ω , c_L , $k = \omega/c_L$ — частота, скорость распространения и волновое число установившегося акустического поля, ω_n — частота собственных колебаний пузырька, R_e — его равновесный радиус. Частота собственных объемных (радиальных) колебаний пузырька определяется выражением [108]:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1}{\rho_L R_e^2} (3n(\bar{p}_\infty - p_V) + 2(3n - 1) \frac{\sigma}{R_e})}, \quad (2.3)$$

где ρ_L — плотность жидкости, n — показатель политропы, σ — поверхностное натяжение, $\bar{p}_\infty$ — среднее равновесное давление, p_V — давление газа внутри пузырька. Если частота колебаний акустического поля ниже частоты собственных колебаний пузырька $\omega < \omega_n$, то первичная сила Бьеркнеса приводит к движению пузырька от узлов поля давления к пучностям. При $\omega > \omega_n$ пузырек движется к узлам. В случае наличия в жидкости пузырьков различного размера первичная сила Бьеркнеса в стоячей акустической волне распределяет их по размеру так, что более мелкие пузырьки скапливаются в пучностях давления, а более крупные — в узлах волны. Первичная сила Бьеркнеса, действующая на пузырек, обусловлена «первичным» акустическим полем (см., например [106]).

Вторичная сила Бьеркнеса связана с возникновением «вторичных» акустических полей, излучаемых самими пузырьками. В случае двух пузырьков вторичная сила Бьеркнеса, являющаяся проявлением вторичного акустического поля, имеет вид [109; 110]:

$$\vec{F}_{Bj_2} = \frac{\rho_L \cdot \vec{e}_{12}}{4\pi L^2} < \frac{dV_1}{dt} \frac{dV_2}{dt} >_T, \quad (2.4)$$

где V_1 и V_2 — объёмы пузырьков 1 и 2, L — радиальное расстояние между центрами пузырьков, $\vec{e}_{12}$ — радиальный единичный вектор между пузырьками 1 и 2.

Если пузырьки колеблются с одинаковой фазой, то они притягиваются друг к другу, в случае колебаний пузырьков с противоположными фазами – отталкиваются.

В [111; 112] исследовалось взаимодействие двух микропузырьков в жидкости в достаточно широком диапазоне акустических частот, давлений, радиусов пузырьков (4 – 200 $\mu\text{м}$) и расстояний между ними. В работе [111] показано, что величина вторичной силы Бьеркнеса существенно зависит от соотношения размеров пузырьков и расстояния между ними. Для пузырьков одинакового радиуса сила монотонно возрастает с уменьшением расстояния, тогда как для неодинаковых по размеру пузырьков наблюдается немонотонное изменение силы, обусловленное рассогласованием их поверхностных колебаний. Особый интерес представляет обнаруженный авторами эффект «зависания» свободного пузырька вблизи другого пузырька закрепленного на расстоянии порядка 130 – 200 $\mu\text{м}$, в то время когда классическая теория [104] предсказывает отталкивание в этом случае. Это противоречие между экспериментом и теорией привело к необходимости пересмотра классических представлений. Как отмечают авторы, пороговое расстояние стабилизации зависит от радиусов пузырьков и параметров акустического поля (частоты и амплитуды), а само явление объясняется комплексом факторов: генерацией акустических микропотоков, нелинейными эффектами колебаний и деформацией поверхности пузырьков. Эти результаты демонстрируют ограниченность классической линейной теории Бьеркнеса, которая не учитывает указанные эффекты.

Дальнейшее развитие теории взаимодействия пузырьков в акустическом поле было осуществлено в работах Заболоцкой [113] и Дойникова [114], в которых предложены модифицированные модели, учитывающие нелинейные эффекты и гидродинамические взаимодействия. Большой вклад в понимание этих процессов внесла также работа [115; 116], где была рассмотрена задача взаимодействия двух сфер переменного радиуса.

Наличие твердой подложки кардинально изменяет динамику газовых пузырьков, приводя к возникновению новых физических эффектов. Исследования для материалов различной смачиваемости продемонстрировали ключевое вли-

яние поверхностных характеристик, включая краевой угол смачивания, шероховатость и химическую природу материала [117]. Эти факторы, отмеченные в обзорных статьях [118; 119] Пьера де Жена, имеют принципиальное значение для практического управления пузырьковыми системами в различных технологических приложениях.

Важным эффектом, наблюдаемым при ультразвуковом воздействии, является модификация смачивающих свойств поверхности. Ряд исследований [120; 121] указывает на то, что вибрации [26; 122], включая ультразвуковые, способствуют преодолению энергетических барьеров, вызванных шероховатостью поверхности, и переходу системы из метастабильного состояния в состояние глобального энергетического минимума (GEM), что непосредственно проявляется в изменении контактного угла. На гидрофобных поверхностях это приводит к устойчивому образованию пузырьковых кластеров с увеличенным временем жизни и существенно измененной динамикой. Согласно работе [90], ультразвуковое воздействие модифицирует гидрофобные участки поверхности, приводя к образованию мезопористых структур (размер пор < 0.5 мкм) и нанопористых оксидных слоев. Эти структурные изменения, в свою очередь, создают систему с обратной связью, дополнительно влияя на динамику пузырьков.

Особую роль в этой системе играет кавитация. Как показано в работе [123], гидрофобные поверхности служат активными центрами нуклеации кавитационных пузырьков, значительно снижая энергетический барьер их образования за счет стабилизации газовых зародышей. При этом, как отмечено в [91], сама кавитация может вызывать изменение смачиваемости поверхности, создавая, таким образом, обратную связь, которая влияет на поведение последующих пузырьков — как кавитационных, так и некавитационного размера.

Таким образом, ультразвуковое воздействие инициирует комплекс взаимосвязанных процессов: прямое изменение смачиваемости модифицирует условия взаимодействия с пузырьками, а кавитация, усиливаясь на гидрофобных участках, вызывает дальнейшую трансформацию поверхности. В настоящей главе экспериментально исследуется проявление этих процессов для твердых поверх-

ностей различной степени гидрофобности (кварца, акрила и тефлона). Такой подход позволяет выявить вклад исходной смачиваемости в наблюдаемые эффекты, что имеет фундаментальное значение для понимания и оптимизации флотационных процессов.

2.2 Описание экспериментальных установок и методики измерений

В экспериментах по исследованию динамики воздушного пузырька в жидкости использовался сонохимический реактор из акрилового стекла с толщиной стенок 3 мм, имеющий форму прямоугольного параллелепипеда (Рис. 2.1, 1) с внутренними размерами $103 \times 103 \times 195 \text{ мм}^3$ (глубина $\times$ ширина $\times$ высота). В

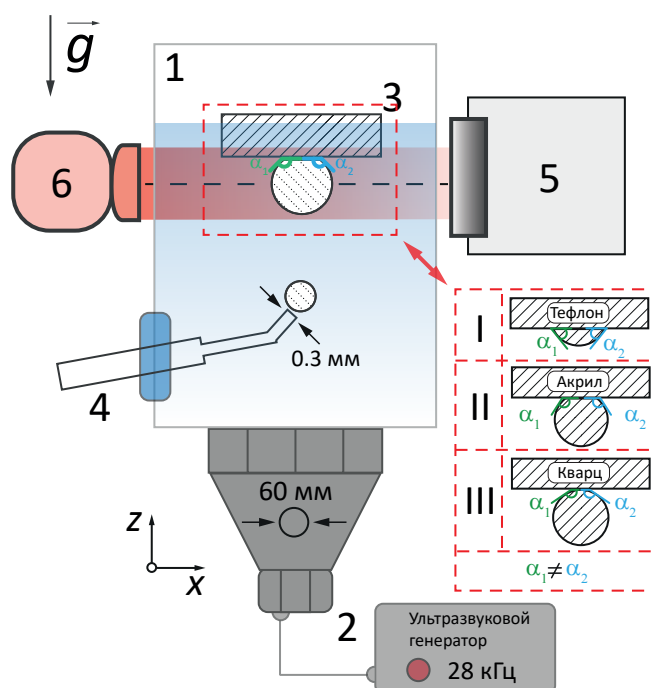


Рисунок 2.1 — Экспериментальная установка: 1) кювета из акрилового стекла размером $103 \times 103 \times 195 \text{ мм}^3$; 2) плоский ультразвуковой преобразователь $f = 28 \text{ кГц}$ с мощностью $P = 32 \text{ Вт}$; 3) исследуемая поверхность (кварц, акрил, тефлон); 4) калиброванный стеклянный капилляр; 5) камера; 6) источник плоскопараллельного света. Схема в правой части рисунка показывает разницу в краевом угле смачивания в зависимости от гидрофильности поверхности (I - кварц, II - акрил, III - тефлон)

нижней части основания реактора было выполнено отверстие диаметром 90 мм, к которому с внешней стороны через силиконовый герметик последовательно крепились резиновая уплотнительная прокладка толщиной 8 мм и стальная мембрана диаметром 90 мм (толщина 0.7 мм, нержавеющая сталь), в ее центральную часть

был вмонтирован пьезокерамический излучатель Ланжевена (Langevin transducer) частотой $f = 28$ кГц и номинальной мощностью $P = 32$ Вт (Рис. 2.1, 2).

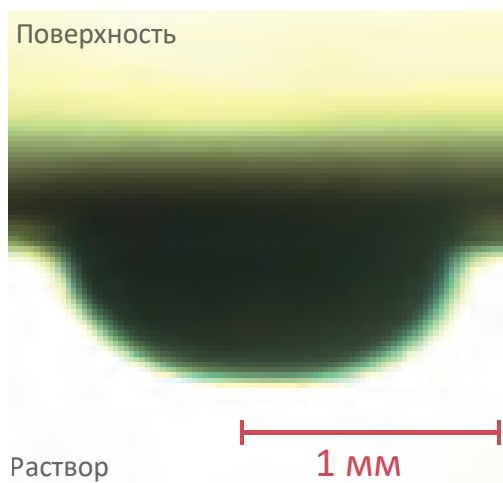
Верхняя граница жидкости в реакторе была открытой (свободной). В ней на расстоянии 20 мм от свободной поверхности, с помощью специального крепления (Рис. 2.1, 3) строго горизонтально фиксировались исследуемые пластины из трех различных материалов: гидрофильного аморфного кварца, умеренно смачиваемого оргстекла и гидрофобного тефлона. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода, очищенной с использованием дистиллятора ДЭ-4, которая перед проведением экспериментов выдерживалась в течение 24 часов в термостатированном помещении ($T_{\text{ком}} = 24 \pm 0.5^\circ\text{C}$) для достижения равновесного содержания растворенных газов при нормальных атмосферных условиях (атмосферное давление 99.72 кПа, 748 мм рт.ст.).

Как показано в работах [90; 124], ультразвуковое воздействие может изменять характеристики твердых поверхностей. Поэтому после каждого эксперимента исследуемая пластина заменялась на новую, что позволяло исключить влияние возможной деградации материала на результаты.

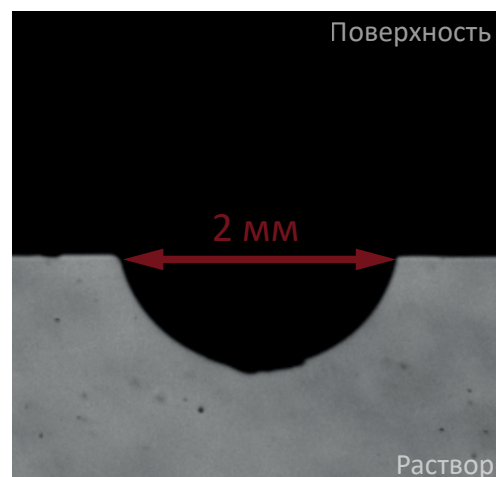
Для создания воздушного пузырька использовался калиброванный стеклянный капилляр, выпускающий в жидкость одиночные воздушные пузырьки при помощи поршневого насоса (Рис. 2.1, 4).

Для регистрации и измерения контактного угла использовались SSD камера Basler acA1920-155um (размер сенсора 11.3 мм $\times$ 7.1 мм, разрешение (ширина $\times$ высота) 1920 пкс $\times$ 1200 пкс, размер пикселя (ширина $\times$ высота) 5.86 мкм $\times$ 5.86 мкм, скорость записи 164 Гц (fps, кадров в секунду)), оснащенную телецентрическим объективом (TC2MHR036-C) и коллимированным источником контрольного света Telecentric HP illuminator (460 нм, 2.5 Вт, *LTCLHP036 – B*). Данная оптическая система позволяла измерять размер пузырька вне зависимости от расстояния между ним и матрицей камеры (Рис. 2.1, 5,6). Минимальный размер фиксируемого пузырька для данной оптической схемы составлял ≈ 32 мкм, при этом глубина резкости составляла 2 см.

Для измерения частоты колебаний пузырька использовалась высокоскоростная камера Basler A504kc (разрешение (ширина $\times$ высота) 1280 пкс $\times$ 1024 пкс, размер пикселя (ширина $\times$ высота) 12 мкм $\times$ 12 мкм, скорость записи 500 Гц (fps, кадров в секунду) при изображении 1280 пкс $\times$ 1024 пкс) и светодиодный источник контрольного света мощностью $P = 30$ Вт. Частота съемки в этом случае составляла 5000 Гц при разрешении 1280 пкс $\times$ 102 пкс.



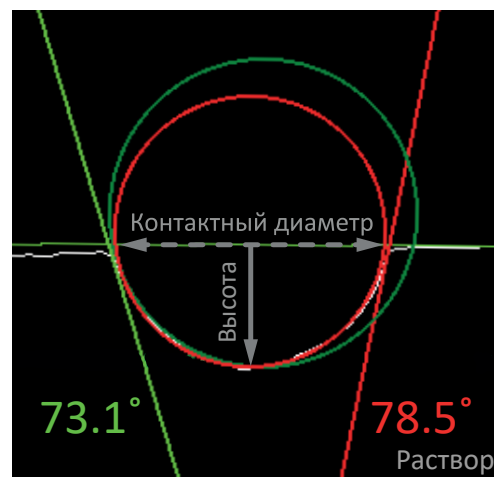
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.2 — а) - Фотография пузырька, полученная с использованием высокоскоростной камеры Basler A504kc, б) - Фотография пузырька, полученная с использованием камеры Basler acA1920-155um оснащенной телецентрическим объективом, в) - Использование тангенциального метода обработки для измерения контактного угла, г) - Результат программной обработки изображения

Полученные в ходе эксперимента фотографии (Рис. 2.2а, 2.2б) обрабатывались с помощью написанной на Python программы, реализующей обработку результатов, основанную на тангенциальном методе измерения контактного угла [97; 98]. На первом этапе производилась бинаризация изображения, чтобы на изображении остался только контур пузырька на поверхности пластины, затем черному цвету присваивалось значение 0, белому - 1. В результате этих действий получался двумерный массив из 0 и 1, элементы которого использовались в последующих расчетах. Далее по этим фотографии (Рис. 2.2в) определялась линия пластинки (l) и максимальное отклонение от нее, соответствующее нижней точке пузырька (p_3), после чего производился поиск крайней (p_1) и промежуточной (p_2) точек на границе пузырька. Далее по этим трем точкам записывались уравнения окружности касательной в крайней точке пузырька. Затем по уравнению прямой, идущей вдоль пластины, и уравнению касательной (k) вычислялся краевой угол ($\Theta, ^\circ$). Следует отметить, что контактный угол допускает различные способы отсчёта. Как показывают ряд исследований [93; 95; 125], в рамках решения обратной задачи гидрофильным поверхностям ставится в соответствие больший угол по сравнению с гидрофобными.

В результате одного эксперимента получались изображения, пример которых показан на рисунках 2.2а, 2.2б. Схема программной обработки изображена на рисунке 2.2в, а итоговый результат представлен на рисунке 2.2г.

Средний диаметр пузырьков, определенный по результатам 50 независимых экспериментов, составил 2 ± 0.5 мм. Это значительно превышает резонансный размер кавитационного пузырька, который может быть рассчитан с помощью формулы [126; 127]:

$$R_r = \sqrt{\frac{3\gamma p_s}{\rho_L (2\pi f)^2}} \quad (2.5)$$

где γ - отношение удельных теплоемкостей, p_s - статическое давление окружающей среды, ρ_L - плотность жидкости, f - частота колебаний. Резонансный размер пузырька воздуха, рассчитанный по формуле (2.5) для частоты ультразвука 28 кГц

составляет $R_r \approx 0.12$ мм. В связи с этим эффекты инерционной кавитации (схлопывание пузырька) не могут наблюдаться в представленных экспериментах.

2.3 Результаты исследования поведения пузырька вблизи поверхностей различной степени смачиваемости

2.3.1 Эксперименты с поверхностью кварцевого стекла

В экспериментах с дистиллированной водой и твердыми пластинами из кварцевого стекла (среднее значение угла смачивания для 50 экспериментов составило $140^\circ \pm 5^\circ$, что соответствует гидрофильной поверхности), как и ожидалось [101], пузырек после формирования, отрыва от капилляра и приближения к пластине, попадает не на твердую поверхность, а на тонкую жидкую прослойку (Рис. 2.3), возникающую между поверхностью пузырька и твердой пластиной, полностью погруженной в жидкость. Жидкая прослойка образуется как на гидрофобных, так и на гидрофильных поверхностях, но в случае гидрофильных поверхностей она обладает большей стабильностью, чем для гидрофобных поверхностей [101; 128; 129]. В соответствии с теорией DLVO, название которой образовано от фамилий создателей — Бориса Владимировича Дерягина, Льва Давидовича Ландау, Эверта Фервея и Теодора Овербека, стабильность жидкой пленки можно рассматривать как баланс между притягивающей Ван-дер-Ваальсовой силой (VDW) и отталкивающими силами двойного поверхностного слоя (DLF) [101; 102]. В ходе проведенных экспериментов было установлено, что воздушный пузырек, поднимающийся из капилляра к кварцевой пластине, не обладает достаточной энергией для разрыва разделяющей их жидкой прослойки и, как следствие, не фиксируется на поверхности при соударении. Наличие прослойки было непосредственно зафиксировано методом визуализации в отраженном лазерном свете. На рисунке 2.3 представлены сравнительные изображения газового пузырька у

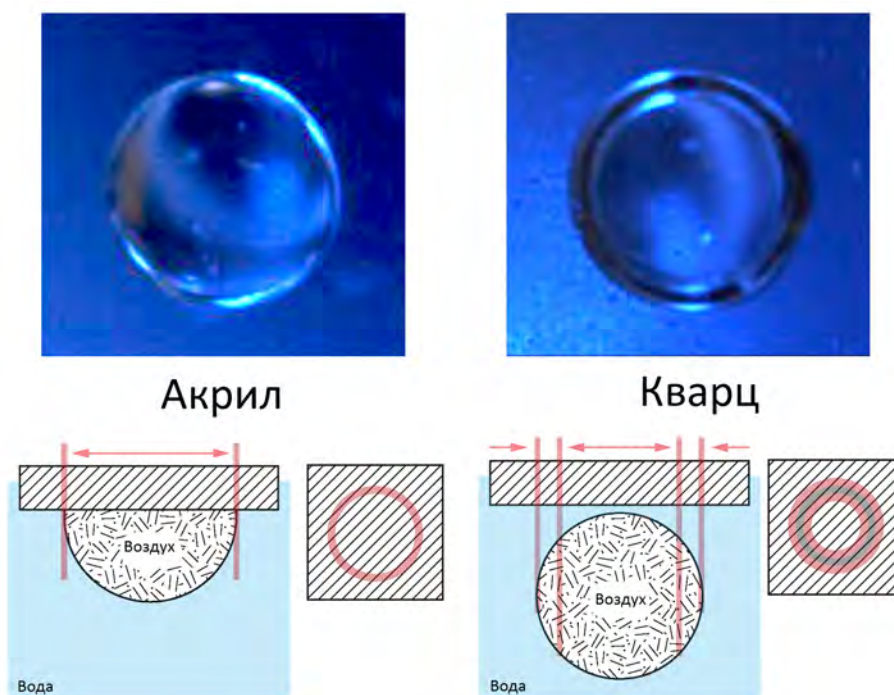


Рисунок 2.3 — Фотографии в отраженном свете для пузырьков воздуха на поверхности акрила и кварца. На поверхности кварца заметно образование черного кольца, указывающего на наличие жидкой пленки

поверхностей акрила и кварца, полученные в настоящей работе: в случае акриловой пластины наблюдается четкая граница пузырька, тогда как для кварцевой поверхности видно характерное тёмное кольцо, которое является прямым свидетельством наличия стабильной жидкой плёнки, препятствующей закреплению пузырька.

При включении ультразвука возникают трансляционные колебания пузырька как целого, а также колебания его формы, что видно на рисунке 2.4. Наблюдения показывают, что в случае кварцевой пластины пузырек колеблется вблизи твёрдой поверхности, не закрепляясь на ней. При этом, приближение и отскок пузырька от твёрдой поверхности могут наблюдаться даже в отсутствие внешнего воздействия (см., например, [130]), однако в этом случае колебания носят затухающий характер, и пузырёк в конечном итоге стабилизируется вблизи поверхности.

Эксперименты, проведенные с кварцевыми пластинками, показали так-же, что под действием ультразвукового поля пузырек перемещается вдоль пластинки (в горизонтальном направлении) в область более низкого давления – узел стоячей

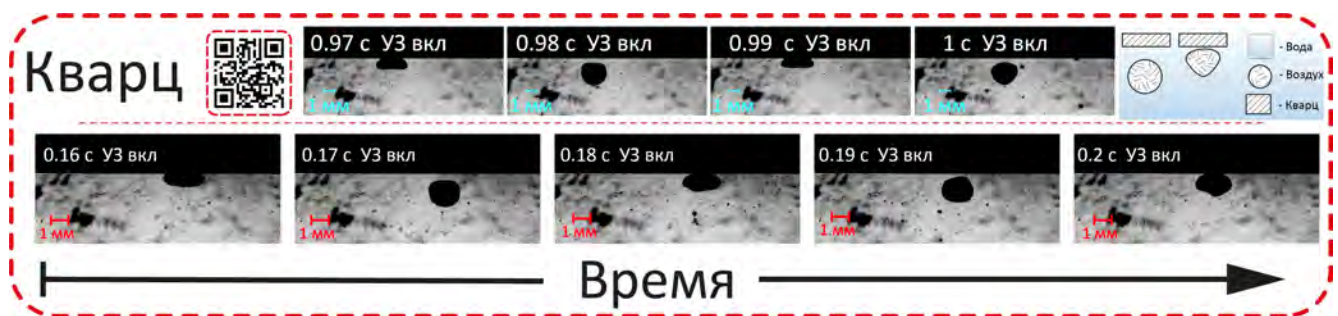


Рисунок 2.4 — Трансляционные колебания воздушного пузырька вблизи гидрофильной поверхности кварцевого стекла под действием ультразвука

волны. Это явление, наблюдалось в работе [131]: при формировании пузырька с помощью капилляра в пучности волны, пузырек смещался под действием акустического поля в область низкого давления (узел). При этом силы адгезии превышали акустические, поэтому пузырек не отделился от капилляра, а занимал устойчивое положение на ней. В нашем эксперименте пузырек мог свободно перемещаться вдоль пластины из-за гидрофильности поверхности. После достижения

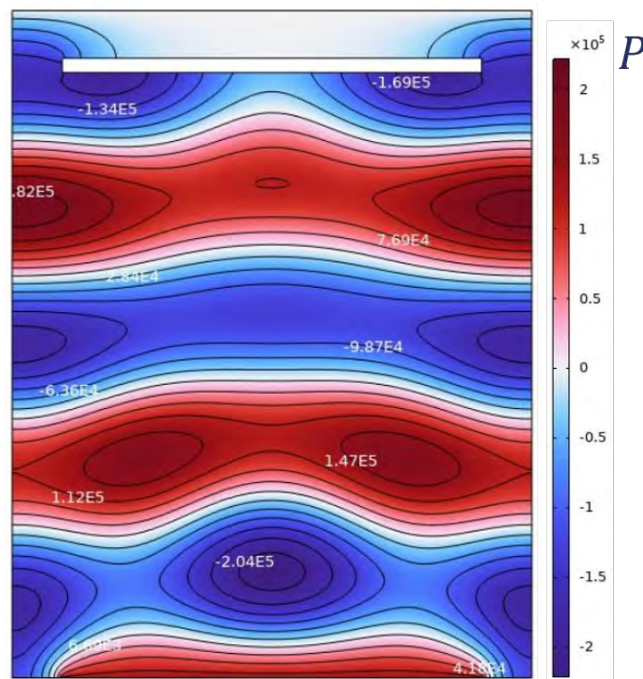


Рисунок 2.5 — Численный расчет распределения звукового давления, возникающий вблизи твердой поверхности проведенный И. О. Сбоевым

области низкого давления горизонтальное смещение пузырька прекращалось, однако сохранялись вертикальные трансляционные колебания пузырька как целого и колебания его формы. Такое поведение обусловлено пространственной неоднородностью акустического поля, создаваемого ультразвуковым воздействием (см.

главу 1). На рисунке 2.5 представлен численный расчёт распределения звукового давления, выполненный И. О. Сбоевым, который демонстрирует возникающую неоднородность в присутствии твёрдой пластинки.

Эта неоднородность связана с интерференцией волн, отражающихся от стенок кюветы, и с наличием пузырьков воздуха в жидкости, которые возникают на пути распространения волны и изменяют акустический импеданс среды [132]. Проявление неоднородности акустического поля видно на рисунке 2.6. Независимо от расположения пузырьков относительно кварцевой пластины, при включении ультразвука они смещались в область с низким давлением. Взаимодействие двух пузырьков, и их коалесценция под действием сил Бьеркнеса, показана на рисунке 2.6. Наблюдаемая динамика подтверждает, что акустические радиационные силы являются доминирующим механизмом, определяющим пространственную организацию пузырьков в ультразвуковом поле.

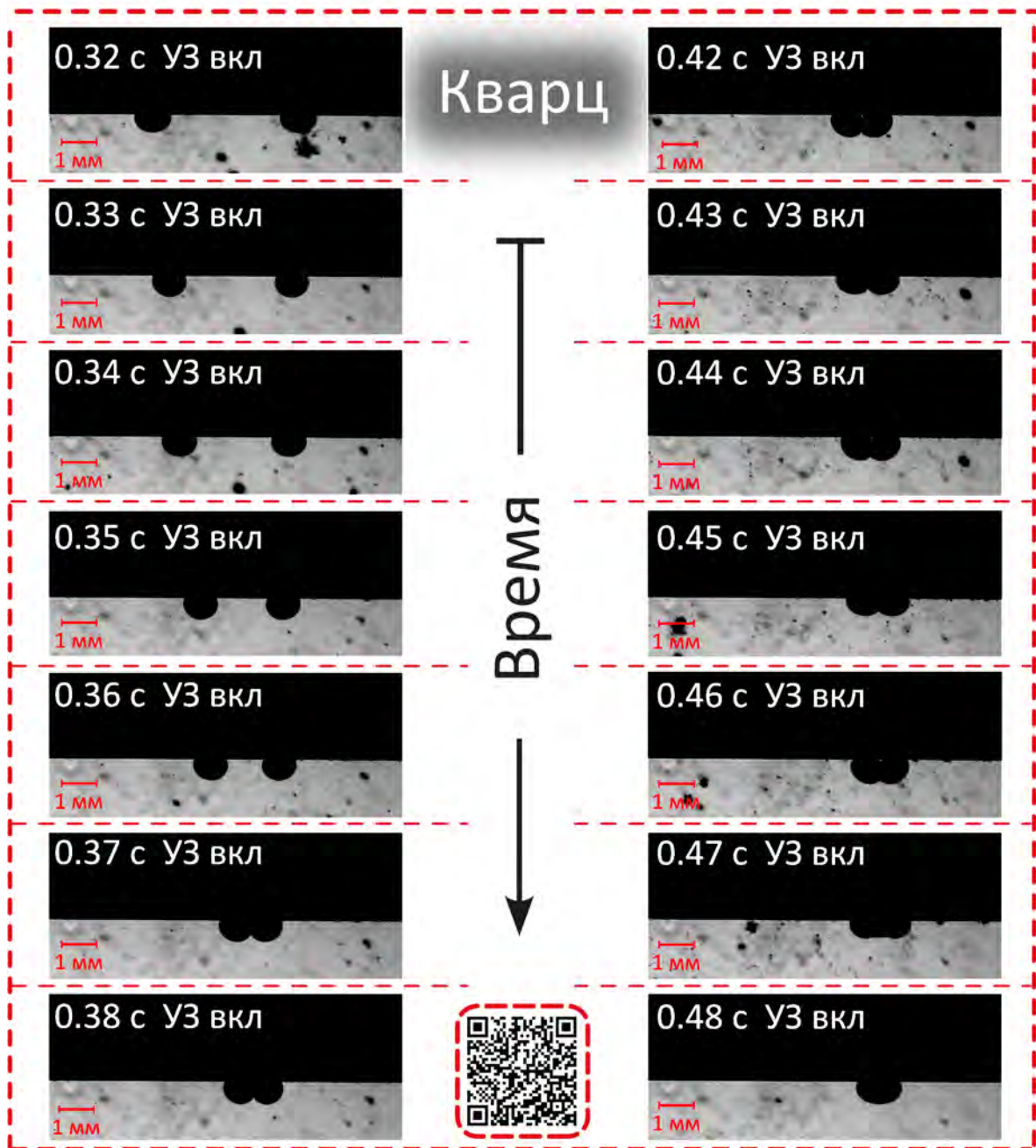


Рисунок 2.6 — Движение двух пузырьков под воздействием ультразвука в область с низким акустическим давлением и их последующее слияние (коалесценция) на поверхности кварца

2.3.2 Эксперименты с поверхностью акрила

В качестве материала с промежуточной степенью смачиваемости в экспериментах использовался акрил: среднее значение угла смачивания без воздействия ультразвука в 50 экспериментах составило $95^\circ \pm 5^\circ$, что соответствует слабогидрофобной поверхности. Эксперименты показали, что в отсутствие ультразвукового воздействия пузырек фиксируется на поверхности акрила. При включении ультразвука, когда силы Бьеркнеса начинают преобладать над силами адгезии, пузырек перемещается вдоль пластины в область с низким акустическим давлением, фиксируется на поверхности, после чего совершает колебания формы и объёма. Трансляционных колебаний пузырька в вертикальном направлении вблизи пластинки в этом случае не наблюдалось. Поскольку акрил является более гидрофобным материалом, в отличие от кварца, трансляционные колебания пузырька в вертикальном направлении вблизи поверхности пластины не наблюдались.

Серия экспериментов с пузырьками, демонстрирующих статический угол на акриловой поверхности до и после ультразвукового воздействия, показаны на рисунке 2.7. В нижней части каждого снимка указаны характерные параметры пузырька (контактный угол, контактный диаметр и высота). В левой части рисунка показаны пузырьки до ультразвукового воздействия, а в правой - через 2 с после того, как ультразвук был выключен (время ультразвукового воздействия в каждом случае составляло 10 с). Из рисунков 2.7 и 2.8 видно, что в результате ультразвукового воздействия в течение 10 с контактный угол пузырька в среднем уменьшается на 10%, независимо от диаметра пузырька. При более длительном воздействии четкой тенденции (Рис. 2.8) в зависимости краевого угла смачивания от времени не наблюдается, помимо вероятного уменьшения угла смачивания, также может наблюдаться его увеличение.

Возникающий после 10 секундного воздействия ультразвука контактный угол, после выключения ультразвука остается неизменным в течение последующих 10 минут, как видно из рисунка 2.9 для поверхности акрила. Изменение

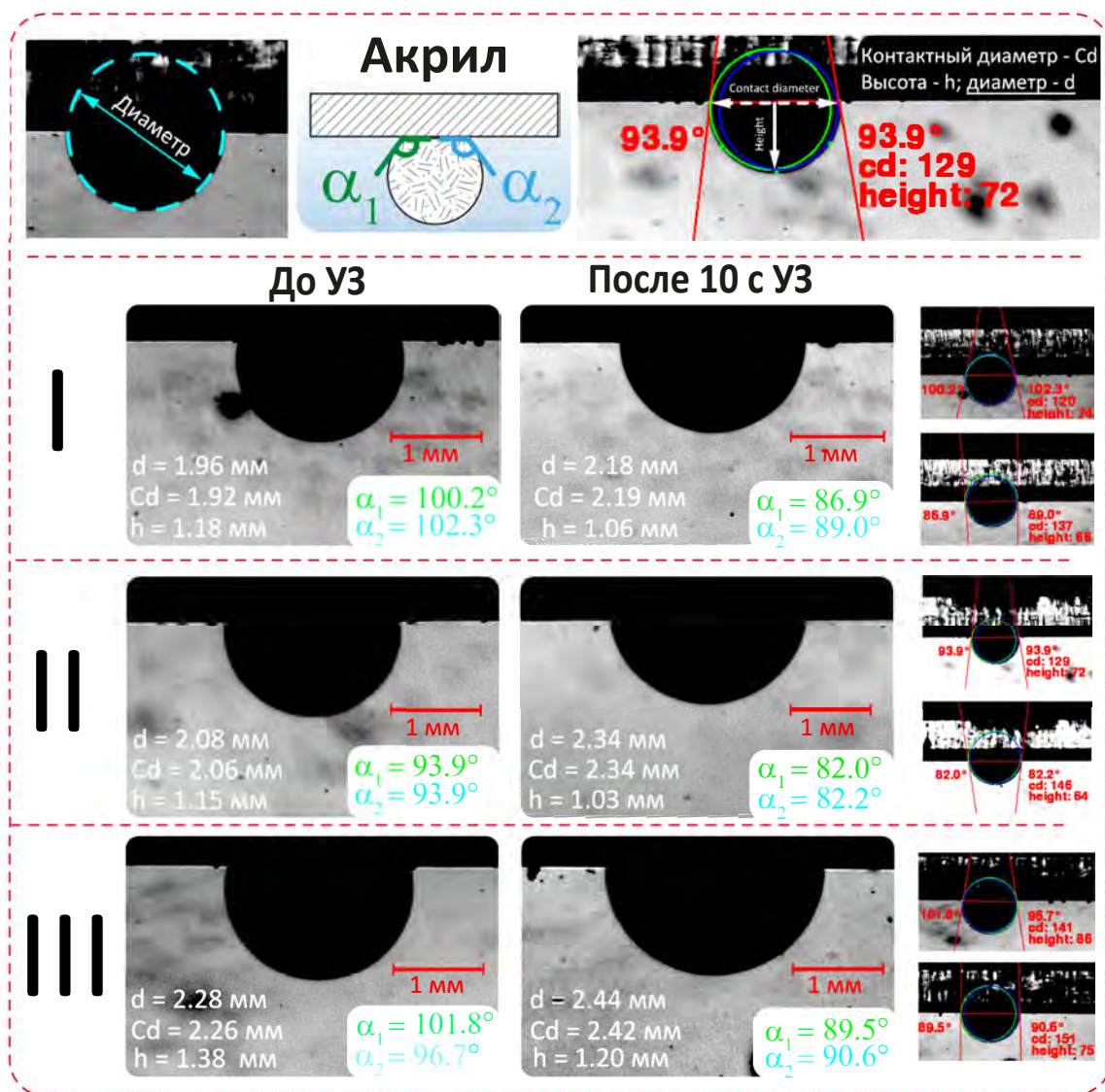


Рисунок 2.7 — Серия экспериментов, показывающих уменьшение угла смачивания для воздушного пузырька закрепленного на акриловой поверхности в результате 10-секундного ультразвукового воздействия

угла контакта может быть объяснено соотношением между поверхностной и кинетической энергиями [119], которые ультразвуковые колебания вносят в систему, что позволяет преодолеть энергетический барьер (см., например, [133—135]) и достичь состояния глобального минимума энергии (GEM - global energy minimum), определяющего контактный угол. В работах [135—137] обсуждается гистерезис угла контакта, вызванный вибрациями поверхности. В этих исследованиях обнаружено, что вибрации позволяют капле преодолеть первоначальную линию контакта, определенную шероховатостью поверхности, в результате чего капля не возвращается в исходное состояние при прекращении вибраций. Колебания пере-

водят каплю из метастабильного состояния с более высокой энергией в состояние с более низкой. Таким образом, причина уменьшения контактного угла может заключаться в том, что колебания пузырька позволяют линии контакта закрепляться за более сильные дефекты шероховатой поверхности. Уменьшение контактного угла может быть также вызвано деформацией пузырька в акустическом поле (сплющивание пузырька в направлении распространения ультразвуковой волны).

Изменение угла контакта также может быть связано и с другими механизмами, например, с процессом кавитации [91; 138]. В результате схлопывания кавитационных пузырьков вблизи твердой поверхности образуются микроструи, вызывающие ее деградацию.

Взаимодействие кислородных радикалов, возникающее в результате действия ультразвука и перераспределения электрического заряда на твердой поверхности, может вызвать заметные изменения двойного электрического слоя (EDL) и, следовательно, угла смачивания. Так, в [120; 121] при колебаниях капли под воздействием ультразвука происходило изменение EDL, что непосредственно отражалось на угле контакта.

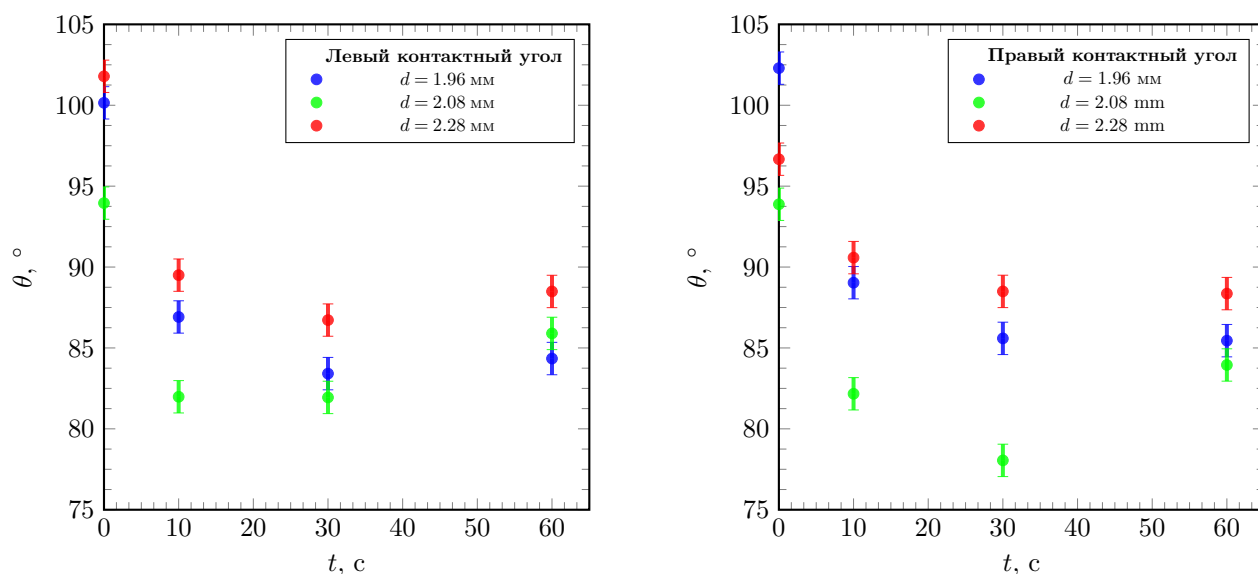


Рисунок 2.8 — Изменение статического угла контакта на акриловой поверхности при различной продолжительности действия ультразвука. Погрешности соответствуют ошибке программной обработки, которая составила 1°

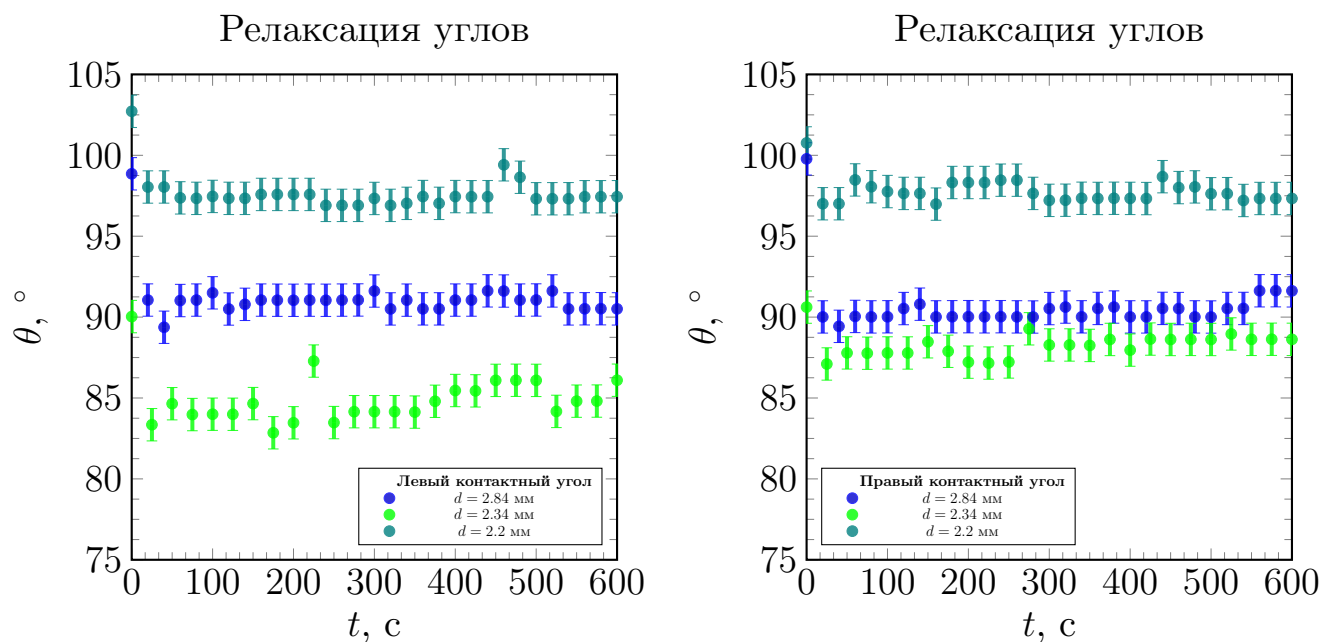


Рисунок 2.9 — Динамика релаксации краевого угла на акриловой поверхности после 10-секундного ультразвукового воздействия

Уменьшение угла также может быть связано с эффектом выпрямленной диффузии и коалесценции с образующимися при ультразвуковом воздействии микропузырьками. Эти явления, как видно из рисунка 2.7, вызывают также увеличение размера пузырька после 10-секундного воздействия.

Напомним, что в случае кварцевой пластины пузырек не закреплялся на твердой поверхности, поэтому измерить характеристики пузырька, представленные в экспериментах с оргстеклом было невозможно. На рисунках 2.10, 2.11 показано изменение во времени левого и правого (в плоскости наблюдения) контактных углов, контактного диаметра, а также высоты пузырька (расстояния между крайней верхней точкой пузырька и средней точкой диаметра контакта, см. рисунок 2.2г), полученные в экспериментах с акриловой пластиной. Из рисунка 2.11 видно, что колебания краевых углов происходят синфазно с колебаниями высоты пузырька, а контактный диаметр колеблется в противофазе с высотой.

В [139] для случая пузырька на твердой подложке под действием пульсаций пространственно однородного поля давления показано, что в результате взаимодействия пузырька с подложкой через движущуюся линию контакта колебания объема вызывают колебания формы. Несмотря на то, что поле давления

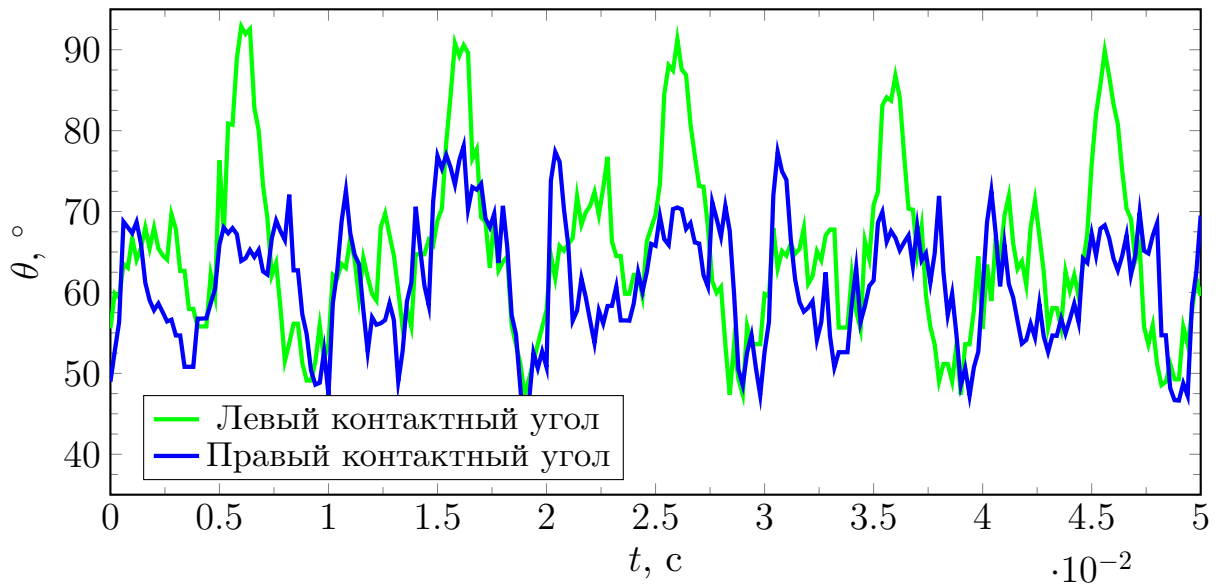


Рисунок 2.10 — Временная динамика изменений левого и правого контактных углов пузырька на акриловой поверхности при ультразвуковом воздействии

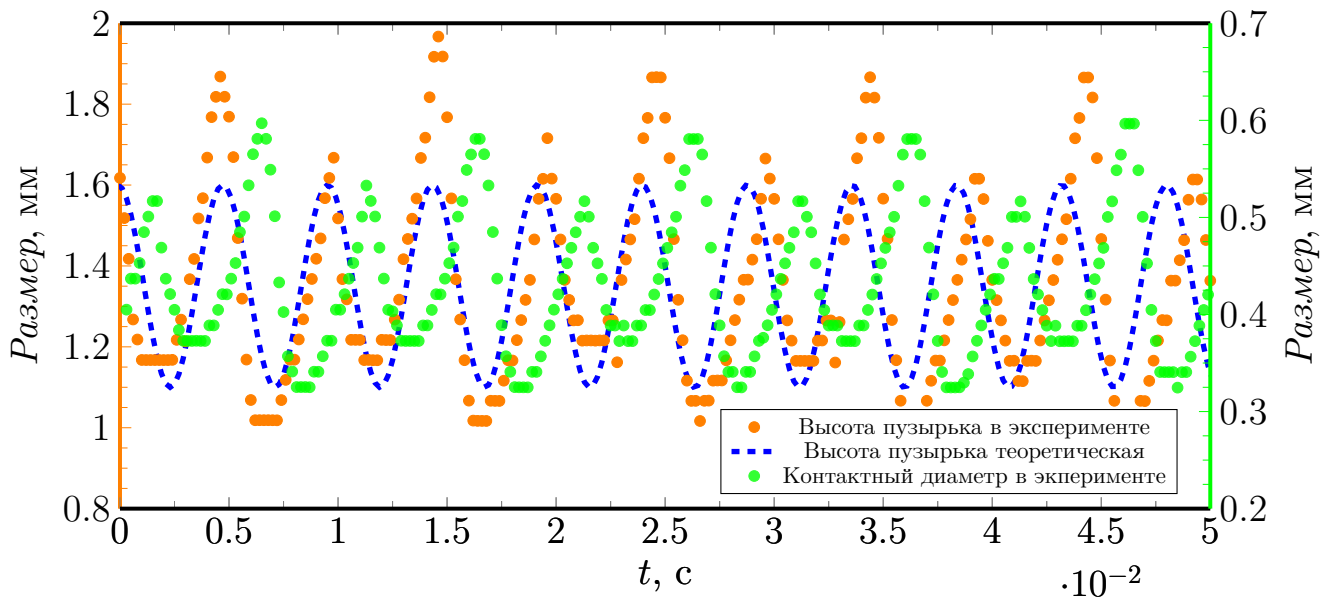


Рисунок 2.11 — Временная динамика изменения контактного диаметра и высоты пузырька на акриловой поверхности при ультразвуковом воздействии для начальной стадии; сравнение экспериментальных данных колебаний высоты пузырька с формулой (2.6) для частоты собственных колебаний формы (2 мода) невязкого, сжимаемого пузырька на акриловой поверхности в жидкости

создаваемое ультразвуком в нашем эксперименте нельзя считать пространственно однородным, (при размере пузырька $d \sim 1$ мм и частоте вынужденных колебаний в 28 кГц - $\lambda/4 \approx 13$ мм условие $\lambda/4 \gg d$ не выполняется) наблюдаются колебания формы поверхности с частотой, равной частоте 2 моды собственных колебаний формы пузырька.

Частота колебаний высоты пузырька (Рис. 2.11) сопоставлялась с частотой собственных колебаний формы первоначально сферического пузырька в безграничной вибрирующей жидкости в невесомости, полученной в пренебрежении вязкостью и сжимаемостью (см., например [140; 141]):

$$\omega^2 = \frac{k(k^2 - 1)(k + 2)\alpha}{\rho_1 * k + \rho_2(k + 1)R^3} \quad (2.6)$$

где $k = 2$ - номер моды, $\rho_1 = 1000$ (кг/м³) - плотность жидкости, $\rho_2 = 1$ (кг/м³) - плотность воздуха, $\alpha = 0.073$ (Н/м) - поверхностное натяжение на границе раздела вода-воздух, R - средний радиус пузырька. Для радиуса пузырька $R = 0.8 \cdot 10^{-3}$ м (диаметр - $d = 1.6$) мм, $\rho_l = 1000$ (кг/м³), $\rho_g = 1$ (кг/м³), $\alpha = 0.073$ (Н/м) из (2.6) получается частота собственных колебаний при $k = 2$, равная $\omega = 2\pi f = 416\pi$, где $f = 208$ Гц, что соответствует полученным экспериментальным данным.

На экспериментальном графике зависимости высоты пузырька ($d = 1.61$ мм) от времени ультразвукового воздействия (Рис. 2.11) также можно увидеть чередование больших и малых пиков. Это явление связано с наличием нескольких гармоник колебаний пузырьков [142], возникающих в результате интерференции волн, генерируемых ультразвуком, с волнами, отраженными от стенок кюветы и границы раздела воздух-вода. Схожие результаты регистрировались и для пузырьков с другими диаметрами.

2.3.3 Эксперименты с поверхностью тефлона

Как показали эксперименты, проведённые с дистиллированной водой и тефлоновыми пластинами (среднее значение угла смачивания для 50 экспериментов составило $65^\circ \pm 5^\circ$, что соответствует гидрофобной поверхности), поведение пузырька в этом случае существенно отличается от наблюдаемого на кварцевом стекле.

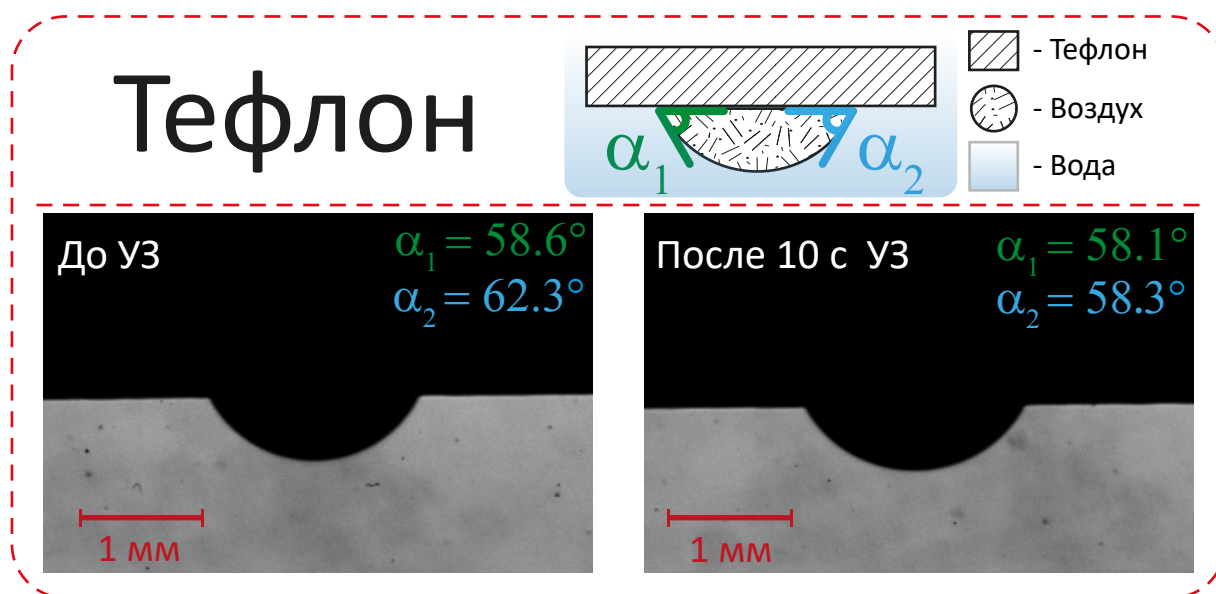


Рисунок 2.12 — Изменение контактного угла для поверхности тефлона после 10-секундного ультразвукового воздействия

Даже при наивысшей (среди исследуемых поверхностей) степени гидрофобности пластины происходило смещение воздушного пузырька в область низкого акустического давления (аналогично ситуации на поверхности стекла - Рис. 2.6), т.е. в узел стоячей волны, с последующими колебаниями поверхности пузырька. Как и в экспериментах с акрилом, отрыва пузырька от твердой поверхности не наблюдалось, поэтому была проведена серия экспериментов, аналогичная выполненным в случае акрила.

Измерения показали, что, как и в случае акрила, в результате непрерывного 10-секундного воздействия ультразвука происходит изменение контактного угла

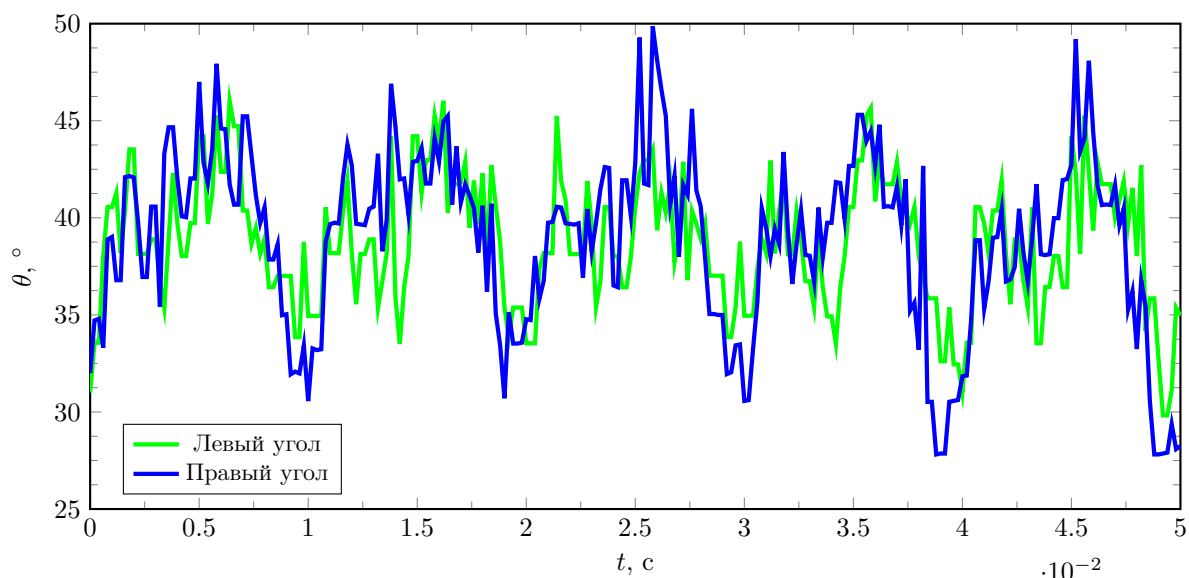


Рисунок 2.13 — Временная динамика изменений левого и правого контактных углов на поверхности тефлона при ультразвуковом воздействии

- рисунок 2.12 (значения зафиксированы после отключения источника ультразвука), динамика изменения представлена на рисунке 2.13.

При этом наблюдаемая в эксперименте картина довольно сложна: происходят как собственные колебания (формы и объема), так и вынужденные (также формы и объема). Вынужденные колебания (в том числе и дыхательная мода колебаний) происходят с частотой возбуждения.

На рисунке 2.13, можно заметить «шум», который, по-видимому, связан с колебаниями объема. Оценить частоту этих колебаний можно по формуле, приведенной, например, в работе [139] и основанной на исследованиях динамики сжимаемого пузыря [143; 144]. При использовании экспериментальных параметров собственная частота радиальных колебаний составляет приблизительно 1000 Гц, что соответствует экспериментальным данным, представленным на рисунке 2.13.

Подстановка параметров пузырька диаметром $d = 1.61$ мм в формулу (2.6) позволили получить теоретическое значение частоты, которое оказывается близко к величине 204 Гц, измеренной в эксперименте с тефлоновой поверхностью (Рис. 2.14). Совпадение экспериментальных и теоретических значений, наблю-

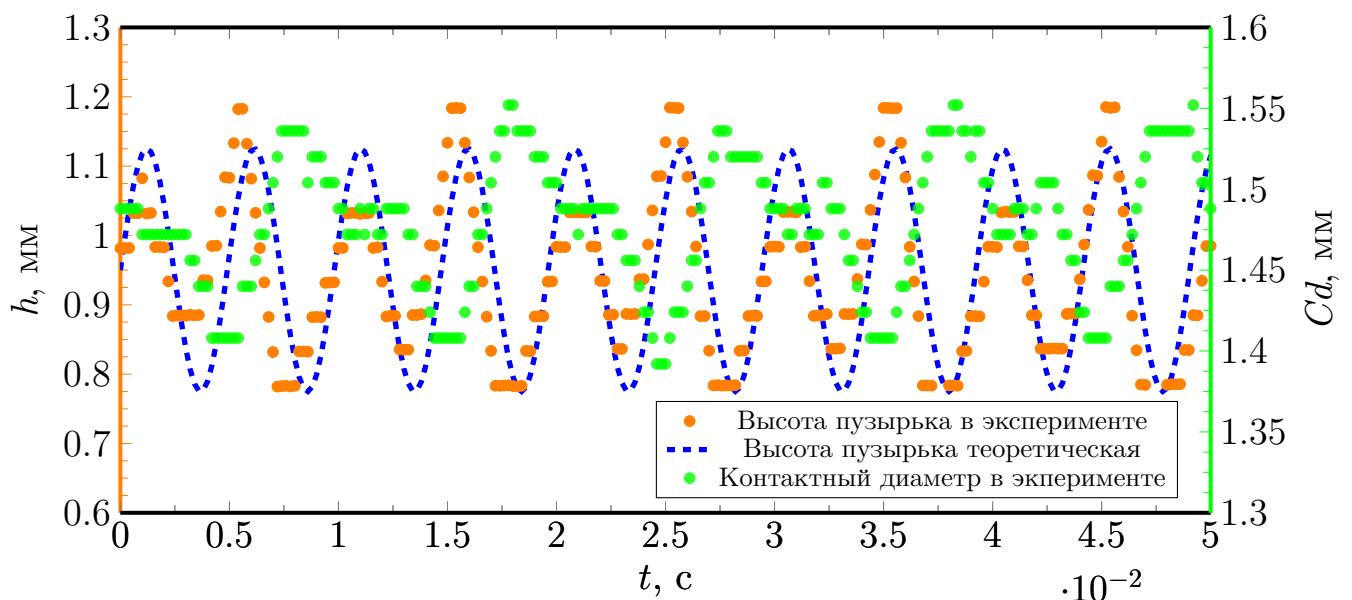


Рисунок 2.14 — Временная динамика изменения контактного диаметра и высоты пузырька на тефлоновой поверхности при ультразвуковом воздействии для начальной стадии; сравнение экспериментальных данных колебаний высоты пузырька с формулой (2.6) для частоты собственных колебаний формы (2 мода) невязкого, сжимаемого пузырька на тефлоновой поверхности в жидкости

даемое также и для акрила, указывает на то, что в обоих случаях возбуждается вторая мода собственных колебаний формы пузырька.

Серия экспериментов с длительностью ультразвукового воздействия 5 мин показала, что диаметр пузырька увеличивается (это показано на Рис. 2.15 и 2.16). Увеличение размера пузырьков под воздействием ультразвука связано с двумя различными эффектами [145]: коалесценцией и ректификационной диффузией. На поверхности погруженной в воду пластины образуется определенное количество микропузырьков, которые, вступая в контакт с более крупным пузырьком под действием ультразвука, объединяются, тем самым увеличивая размер исследуемого пузырька. Увеличение размера пузырьков за счет коалесценции происходит быстрее, чем за счет диффузии. Когда диаметр пузырька увеличивается, частота собственных колебаний формы уменьшается. В экспериментах диаметр пузырька за пять минут ультразвукового воздействия увеличился с $d = 1.61$ мм до $d = 2.6$ мм (Рис. 2.15, 2.16). При этом частота колебаний формы снизилась с 204 Гц до

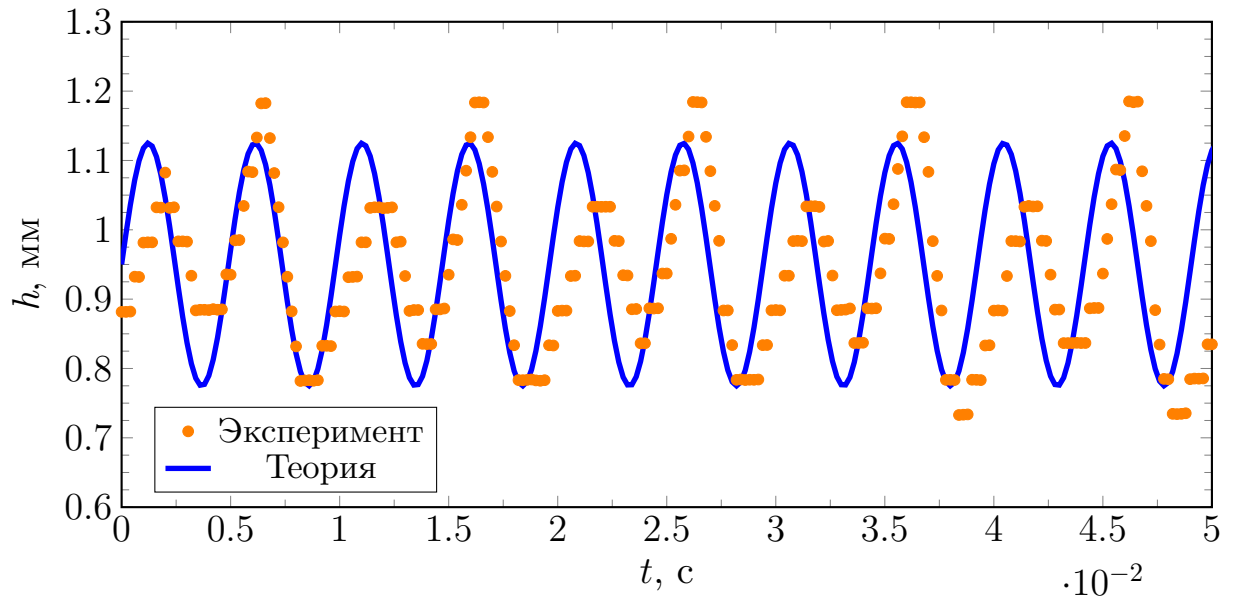


Рисунок 2.15 — Сопоставление экспериментальных данных о колебаниях высоты пузырька на тефлоне с теоретическим значением для частоты собственных колебаний формы (2 мода) несжимаемого невязкого пузырька диаметром $d = 1.61$ мм

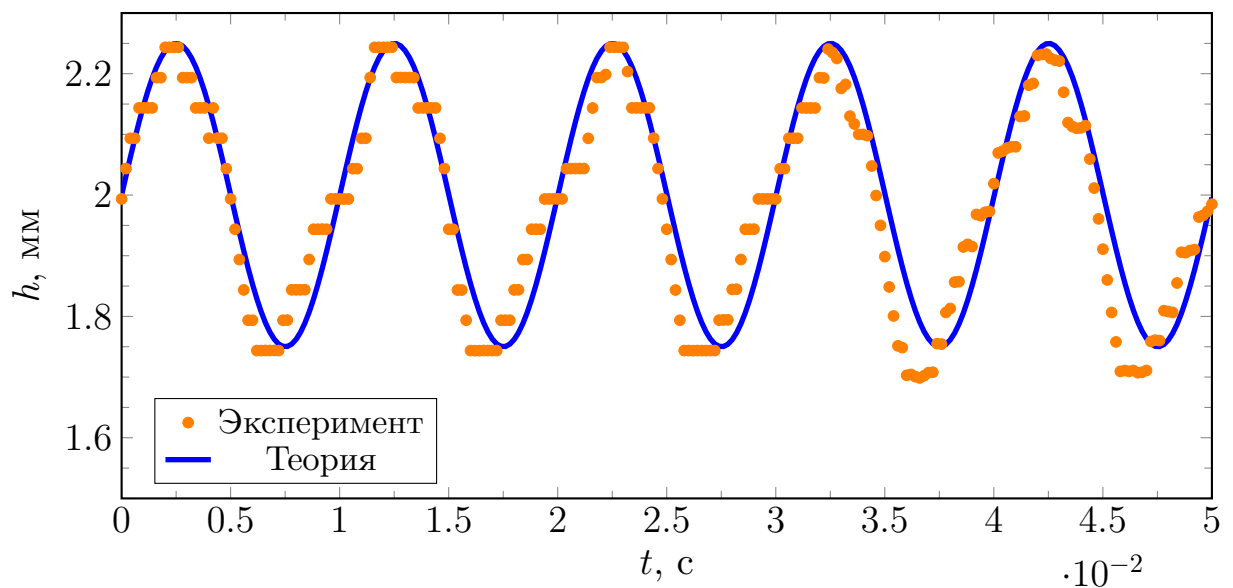


Рисунок 2.16 — Сопоставление экспериментальных данных о колебаниях высоты пузырька на тефлоне с теоретическим значением для частоты собственных колебаний формы (2 мода) несжимаемого невязкого пузырька. На данном графике зафиксирована последняя стадия эксперимента, в результате которого частота колебаний высоты пузырька уменьшается в 2 раза в связи с увеличением его диаметра до $d = 2.6$ мм

100 Гц. Эти результаты согласуются с изменением собственной частоты колебаний формы при увеличении диаметра пузырька, предсказанным уравнениям (2.6).

2.4 Заключение по главе

В данной главе представлены результаты экспериментального исследования влияния ультразвука на поведение воздушных пузырьков вблизи и на твердых поверхностях с различной степенью смачиваемости. Исследования проводились методом плененного пузырька для трех типов поверхностей: кварца, акрила и тефлона.

Эксперименты показали, что в случае относительно гидрофильной пластины из кварца пузырек не закрепляется на твердой поверхности, между ними остается тонкий слой жидкости. Ультразвуковое воздействие приводит к перемещению пузырька вдоль пластины в область низкого давления. При достижении данной области пузырек совершает трансляционные колебания в вертикальном направлении, приближаясь и удаляясь от твердой пластины, это движение сопровождается колебаниями формы пузырька.

В случае более гидрофобной, акриловой пластины, жидкая прослойка между пузырьком и твердой поверхностью не наблюдается. При этом, после приближения к твердой поверхности пузырек смещается в область низкого акустического давления, закрепляется на твердой поверхности, после чего наблюдаются только колебания формы. Аналогичное поведение пузырька при ультразвуковом воздействии наблюдается и для наиболее гидрофобной, тефлоновой поверхности.

Обнаружено, что на коротких временных масштабах (порядка 10^{-2} с) наблюдаются колебания всех характеристик формы пузырька вблизи некоторых средних значений с частотой, близкой к частоте, второй моды собственных колебаний формы для сферического пузырька.

Найдено, что ультразвуковое воздействие приводит к уменьшению статического контактного угла на поверхности акрила и тефлона. Установившийся в результате десятисекундного ультразвукового воздействия статический контактный угол в течение последующих после выключения ультразвука десяти минут

сохраняет постоянное значение, что свидетельствует об отсутствии релаксационных процессов.

Практическая значимость полученных результатов заключается в их важности для разработки методов управления поведением газовых пузырьков вблизи и на твердых поверхностях с различной степенью смачиваемости с помощью ультразвукового воздействия. Экспериментально установлено, что ультразвуковая обработка индуцирует гидрофобизацию поверхности, что имеет ключевое значение для регулирования процессов смачивания и адгезии при флотационном обогащении полезных ископаемых. В частности, управляемое изменение смачивающих свойств позволяет повысить эффективность закрепления минеральных частиц на пузырьках, что непосредственно влияет на извлечение ценных компонентов. Полученные результаты также могут быть использованы для модификации твердых поверхностей в различных промышленных процессах, где требуется направленное изменение смачивающих свойств без применения химических реагентов.

ГЛАВА 3. ГЕНЕРАЦИЯ ПУЗЫРЬКОВ С ПОМОЩЬЮ КВАРЦЕВОЙ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННОЙ МЕМБРАНЫ И ИХ ПОВЕДЕНИЕ В ВОДЕ И ВОДНЫХ РАСТВОРАХ NaCl И SDS ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

3.1 Введение

Настоящая глава посвящена разработке методики и экспериментальному исследованию генерации пузырьков в растворах NaCl и SDS различной концентрации, включая измерение их размеров и количества, а также изучению возможностей управления параметрами пузырьков с помощью ультразвукового воздействия.

В ряде ключевых технологических процессов, таких как барботаж, флотация, ферментация и очистка сточных вод, критически важным является формирование и использование моодисперсных пузырьков заданного размера. Так, в процессе флотационного обогащения тонкодисперсных руд существует ряд проблем с созданием большого количества мелких пузырьков, обеспечивающих высокую вероятность столкновения и эффективное извлечение ценного компонента. В барботажных реакторах размер пузырьков напрямую влияет на площадь межфазной поверхности и, следовательно, на скорость массообмена и эффективность процесса. Поэтому для управления этими процессами необходимо глубокое понимание поведения как процессов образования, так и динамики пузырьков в жидкостях, а также возможность ими управлять [27—30; 122; 146].

Исследование поведения пузырьков особенно важно в контексте сонохимии, поскольку уже существующие в жидкости пузырьки существенно влияют на распространение и эффективность ультразвукового поля. Кроме того, само ультразвуковое воздействие способно индуцировать образование парогазовых пузырьков (кавитацию). Как показано в работе [147], эффективность сонохи-

мического реактора критически зависит от кавитационной активности, которая определяется динамикой пузырьков — их количеством, размерами и кинетикой схлопывания. Таким образом, задача целенаправленного управления параметрами пузырьков, решаемая в настоящей работе, имеет фундаментальное междисциплинарное значение. Полученные результаты могут быть использованы как для оптимизации традиционных процессов с газожидкостными системами, так и для разработки высокоэффективных сонохимических технологий.

Существуют различные методы генерации пузырьков, такие как мембранный [148], инжектированные воздушной струи, использование трубки Вентури, и другие [148—150]. Рассмотрим подробнее основные из них.

Мембранный метод представляет собой технологию, основанную на пропускании газа через пористую мембрану, находящуюся в жидкости [151]. Мембраны могут изготавливаться из различных материалов, включая керамику, металлы (например, нержавеющую сталь), полимерные материалы (PTFE - политетрафторэтилен, PVDF - поливинилиденфторид) и композиты. Размер образующихся пузырьков в этом случае определяется размером пор мембраны, а также физико-химическими свойствами газожидкостной системы. Главным преимуществом метода выступает возможность создания пузырькового потока с предсказуемыми и контролируемыми параметрами. Мембранный метод особенно эффективен при работе с малыми объёмами жидкости и обеспечивает стабильное качество генерации газовых включений. Однако этому методу присущ ряд недостатков: относительно невысокая производительность, склонность к загрязнению пор мембраны частицами или реагентами, а также необходимость в использовании специализированного оборудования.

Метод инъекции воздушной струи базируется на принципе впрыска газа в поток жидкости под давлением [152]. Основное достоинство этого способа — простота технической реализации и относительная дешевизна оборудования. Тем не менее, метод характеризуется значительной неоднородностью распределения образующихся пузырьков по размеру, что ограничивает его применение в задачах, требующих высокой точности размеров генерируемых пузырьков.

Трубка Вентури [153], [154] использует эффект снижения давления в сужении трубы для создания пузырьков, что является прямым применением принципа Бернулли, устанавливающего обратную зависимость между скоростью потока жидкости и её статическим давлением. При прохождении жидкости через сужающийся конфузор её скорость возрастает, вызывая значительное падение давления в горловине, что приводит к инжекции газа через боковое отверстие и его последующему диспергированию в высокоскоростном турбулентном потоке с образованием пузырьков. Данный метод обеспечивает высокую производительность генерации, что делает его привлекательным для крупномасштабных промышленных процессов. Однако существенные недостатки, такие как формирование пузырьков различного диаметра в широком диапазоне из-за неконтролируемой турбулентности и повышенные энергозатраты на поддержание процесса, связанные с необходимостью создания высоких скоростей потока для достижения значительного перепада давления, могут создавать сложности при необходимости получения пузырьков определённого размера.

Ультразвуковая генерация [155] основана на кавитационном эффекте, возникающем при воздействии ультразвуковых волн на жидкость. Ключевое преимущество этого метода — возможность получения пузырьков с чётко определённым распределением по размерам в широком спектре (от субмикронных до миллиметровых масштабов) и точная регулировка параметров через изменение мощности и частоты ультразвукового воздействия [156]. При этом размер пузырьков можно контролировать с высокой точностью. Однако длительное воздействие ультразвука приводит к дегазации жидкости, что делает дальнейшую генерацию пузырьков невозможной.

Эффективность генерации и объём производства пузырьков в единицу времени существенно различаются в зависимости от выбранного метода. Ультразвуковой метод обеспечивает наилучший контроль над распределением по размеру пузырьков, но ограничен по времени работы. Мембранный метод отличается высокой точностью, хотя и имеет меньшую производительность. Системы с

инжекцией и трубкой Вентури предлагают компромисс между производительностью и контролем размерного распределения пузырьков [157].

Выбор оптимального метода генерации зависит от множества факторов: требуемых характеристик пузырьков, необходимой производительности, экономических соображений и специфики технологического процесса [158]. Каждый из описанных методов обладает достоинствами и ограничениями, что обуславливает целесообразность его применения в конкретных производственных условиях. Внимания заслуживает возможность комбинированного использования различных методов генерации, что требует детального изучения их взаимного влияния и совокупного воздействия на процесс формирования пузырьков. Важно понимать механизмы такого взаимодействия и прогнозировать их влияние на конечный результат генерации.

Физико-химические свойства жидкости тоже оказывают существенное влияние на процесс генерации пузырьков. В настоящее время в промышленности активно используются различные типы воды: морская вода, характеризующаяся высоким содержанием минеральных солей; грунтовая вода, содержащая разнообразные природные примеси; а также оборотная вода, которая ранее уже была задействована в производственных циклах. Качество используемой воды имеет первостепенное значение для эффективности производственных процессов. Используемая вода может содержать широкий спектр примесей органического и неорганического происхождения, включая тяжелые металлы, органические соединения, микроорганизмы и взвешенные частицы. Эти примеси оказывают существенное влияние на различные технологические процессы, такие как барботаж, аэрация, очистка и др. Механизм влияния примесей на технологические процессы обусловлен их способностью модифицировать физико-химические свойства водной среды. Различные химические компоненты — например, ионы солей [39; 159; 160], молекулы поверхностно-активных веществ (ПАВ) [161; 162], органические кислоты и другие соединения — способны существенно изменять такие важные характеристики, как поверхностное натяжение, вязкость, электропроводность технологических жидкостей. В результате этих изменений

наблюдается модификация взаимодействия воздушных пузырьков как между собой, так и с твердыми поверхностями и включениями. Это может приводить к подавлению процессов коалесценции (слияния пузырьков) [163], что в ряде технологических операций оказывается весьма полезным. Например, в процессах очистки воды, обогащения полезных ископаемых [164] и других промышленных приложениях контролируемое подавление коалесценции позволяет повысить эффективность обработки и улучшить качество конечного продукта. Для минимизации негативного воздействия примесей воду можно предварительно очищать. Однако такие методы зачастую являются чрезвычайно энергоемкими и требуют значительных затрат. В связи с этим ключевое значение приобретает понимание механизмов влияния примесей в воде на физико-химические процессы, что позволяет оптимизировать промышленные технологии и повысить их эффективность без существенного роста эксплуатационных расходов.

В контексте управления параметрами пузырьков особый интерес представляют работы, посвященные совместному действию ультразвука и химических реагентов. Исследования [32; 52] показали, что использование ПАВ позволяет не только регулировать размер пузырьков, но и значительно увеличивать их концентрацию, что особенно важно для процессов колонной флотации. Кроме того, в работе [48] подчеркивается потенциал ультразвука для интенсификации массообменных процессов в барботажных системах.

Ярким примером является флотация сильвинита (калийной руды), которая происходит в насыщенных солевых растворах. Высокие концентрации электролитов существенно влияют на распределение и поведение пузырьков и, как следствие, влияют на эффективность всего процесса. Таким образом, комплексное изучение влияния солей и других примесей на взаимодействие частиц, пузырьков и реагентов представляет собой необходимое условие для целенаправленного управления технологическими процессами.

В рамках настоящей главы проводится экспериментальное исследование особенностей поведения пузырьков, генерируемых посредством кварцевой мем-

браны под воздействием ультразвукового поля, в воде и её растворах с добавлением NaCl и SDS.

3.2 Описание экспериментальных установок и методики измерений

Для исследования процесса генерации микропузырьков при наличии и в отсутствие ультразвукового воздействия в воде и водных растворах NaCl и SDS использовалось два вида экспериментальных установок (Рис. 3.1). На рисунке

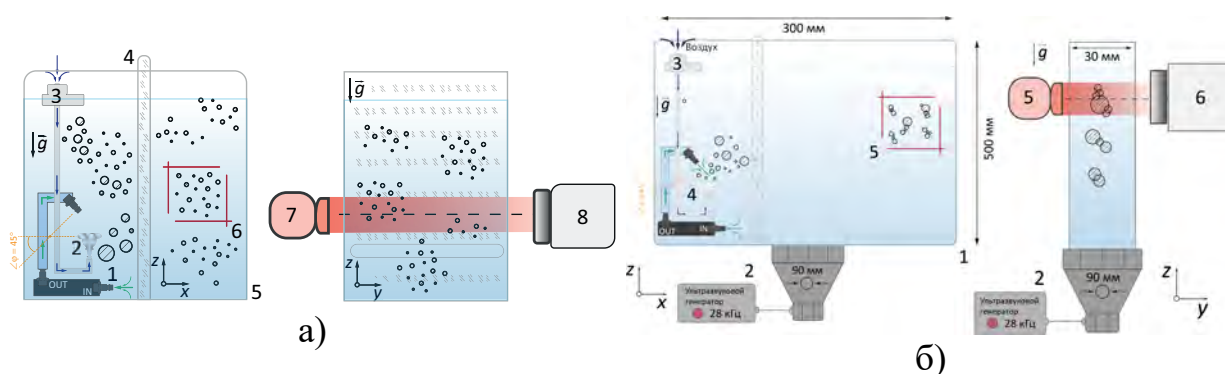


Рисунок 3.1 — Схема экспериментальной установки: а) – без источника ультразвука: 1) погружной водяной насос; 2) кварцевая ультрафильтрационная мембраны; 3) воздушный компрессор; 4) ограничитель из оргстекла; 5) кювета размером $300 \times 30 \times 500 \text{ мм}^3$; 6) зона съёмки; 7) коллимированный источник света; 8) камера с телецентрическим макрообъективом; б) – с источником ультразвука: 1) кювета размером $300 \times 30 \times 500 \text{ мм}^3$; 2) источник ультразвука частотой 28 кГц; 3) воздушный компрессор; 4) водяной насос; 5) коллимированный источник света; 6) камера, оснащенная телецентрическим макрообъективом

3.1а показана кювета без источника ультразвука, с внешними размерами $300 \times 30 \times 500 \text{ мм}^3$. В случае кюветы (Рис. 3.1б), оснащенной ультразвуковым излучателем, геометрия установки усложнялась: в центральной части размещалась круглая мембрана из нержавеющей стали (диаметром 90 мм, толщиной 0.7 мм) с вмонтированным в неё пьезокерамическим излучателем Ланжевена, работающим на частоте 28 кГц при номинальной мощности 32 Вт (см. Рис. 3.1б, 2).

Генерация пузырьков осуществлялась с использованием кварцевой ультрафильтрационной мембраны (фильтр Шотта: класс UF, диаметр пор $0.9 - 1.4 \text{ мкм}$, Рис. 3.1а 2), совместно с погружным центробежным насосом JT-DS3W-4.5 (мощность 9.1 Вт , с максимальной производительностью 2 л/мин , Рис. 3.1б, 1) и поршневым компрессором Waco-301 (мощность 15 Вт , Рис. 3.1б, 3). Во всех экспериментах расходы поддерживался на постоянном уровне: 1 л/мин для воздуха (компрессор) и 2 л/мин для воды (погружной насос). Компрессор подавал газ через ультрафильтрационную мембрану для образования пузырьков. Одновременно центробежный насос, забирая воду из кюветы, создавал поток жидкости, который направлялся под углом 45° к поверхности мембраны. Этот поток обеспечивал лучший отрыв и снос пузырьков от мембраны в объем жидкости. Как видно из представленных на рисунке 3.2 фотографий области над мембраной, такое течение эффективно предотвращает коалесценцию пузырьков, способствуя формированию более мелких и монодисперсных газовых включений по сравнению со статическими условиями. В непосредственной близости от генератора пузырьков

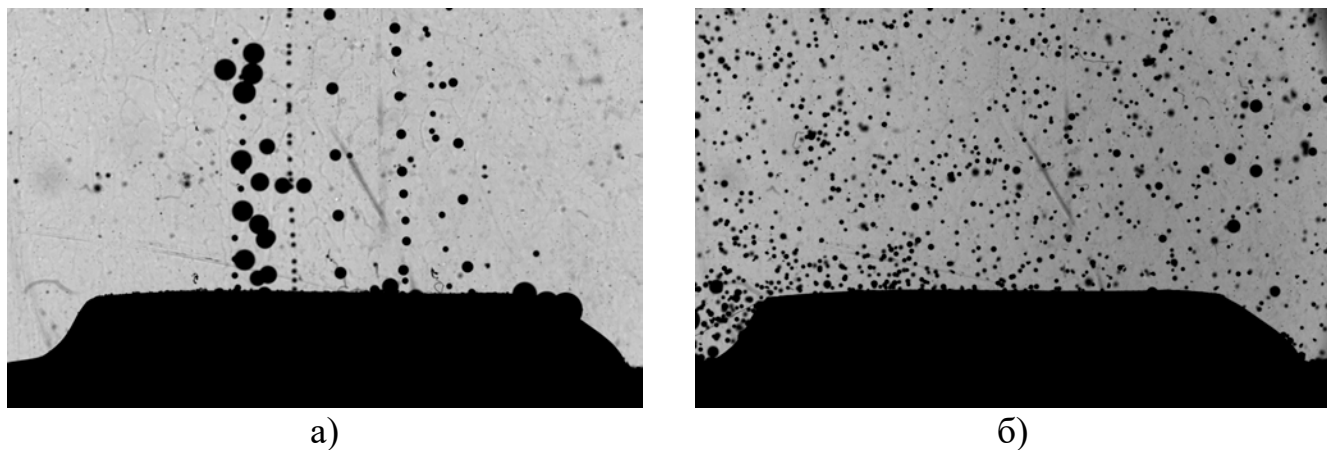


Рисунок 3.2 — Фотографии пузырьков, получаемые в экспериментах при различных способах генерации пузырьков: (а) - без течения; (б) - с течением

(на расстоянии 20 мм) внутри кюветы был установлен ограничительный элемент из органического стекла (элемент 4 на рисунке 3.1а). Конструкция ограничителя имела отверстие размером $6 \times 20 \text{ мм}^2$, расположенное ниже уровня генератора пузырьков. Такое расположение обеспечивало эффективную сепарацию крупных

пузырьков и снижало влияние гидродинамических возмущений от насоса на поведение пузырьков в объеме установки.

Область оптической регистрации пузырьков, отмеченная красным цветом на рисунках 3.1а, 6 и 3.1б 5, располагалась в центральной части кюветы между оргстеклянным ограничителем и боковой стенкой. Оптическая система включала камеру Basler acA1920-155um (размер сенсора 11.3×7.1 мм², разрешение 1920×1200 пкс при частоте 164 Гц, размер пикселя 5.86×5.86 мкм), оснащенную телецентрическим объективом (TC2MHR036-C) и коллимированным источником контрольного света Telecentric HP illuminator (460 нм, 2.5 Вт, *LTCLHP036 – B*). Данная конфигурация обеспечивала измерение размеров пузырьков с минимальным детектируемым диаметром ≈ 32 мкм при глубине резкости 2 см.

В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная и бидистиллированная вода (выдержанная в течение 24 ч при температуре $T_{\text{ком}} = 24 \pm 0.5^\circ\text{C}$), а также водные растворы NaCl ($C = 0.1 - 0.3$ моль/л) и додецилсульфата натрия (SDS, $C = 0.5 - 3.0$ ммоль/л).

Подготовка растворов проводилась непосредственно перед экспериментами с использованием аналитических весов OHAUS AR 3130 ($\Delta m = 0.001$ г) и калиброванного мерного цилиндра ($V = 4000$ мл). Температура рабочей среды поддерживалась в диапазоне $T_{\text{ком}} = 24 \pm 0.5^\circ\text{C}$.

Концентрация растворов рассчитывалась по формуле (3.1), а масса навески определялась согласно уравнению (3.2).

$$C = n/V = m/(Mr \cdot V), \quad (3.1)$$

$$m = C \cdot Mr \cdot V \quad (3.2)$$

Результаты расчетов концентраций представлены в таблице 1. Символ $\div$ обозначает диапазон номеров экспериментов. Для анализа из каждого диапазона выбирался один характерный эксперимент: например, обозначение 2.1.0 соответствует эксперименту №2 с концентрацией SDS 0.5 ммоль/л (первый уровень) и без добавления NaCl (нулевой уровень).

Код эксперимента	V , л	$M_r(\text{SDS})$, г/моль	C_{SDS} , ммоль/л	m_{SDS} , г	$M_r(\text{NaCl})$, г/моль	C_{NaCl} , моль/л	m_{NaCl} , г
1 ÷ 3.1.0	4.0	288	0.5	0.576	58	-	-
1 ÷ 3.2.0	4.0	288	1.0	1.152	58	-	-
1 ÷ 3.3.0	4.0	288	1.5	1.728	58	-	-
1 ÷ 3.4.0	4.0	288	3.0	3.456	58	-	-
1 ÷ 3.0.1	4.0	288	-	-	58	0.1	23.2
1 ÷ 3.0.2	4.0	288	-	-	58	0.2	46.4
1 ÷ 3.0.3	4.0	288	-	-	58	0.3	69.6
1 ÷ 3.4.1	4.0	288	3.0	3.456	58	0.1	23.2
1 ÷ 3.1.3	4.0	288	0.5	0.576	58	0.3	69.6
1 ÷ 3.2.3	4.0	288	1.0	1.152	58	0.3	69.6
1 ÷ 3.3.3	4.0	288	1.5	1.728	58	0.3	69.6
1 ÷ 3.4.3	4.0	288	3.0	3.456	58	0.3	69.6

Таблица 1 — Результаты расчета концентраций растворов

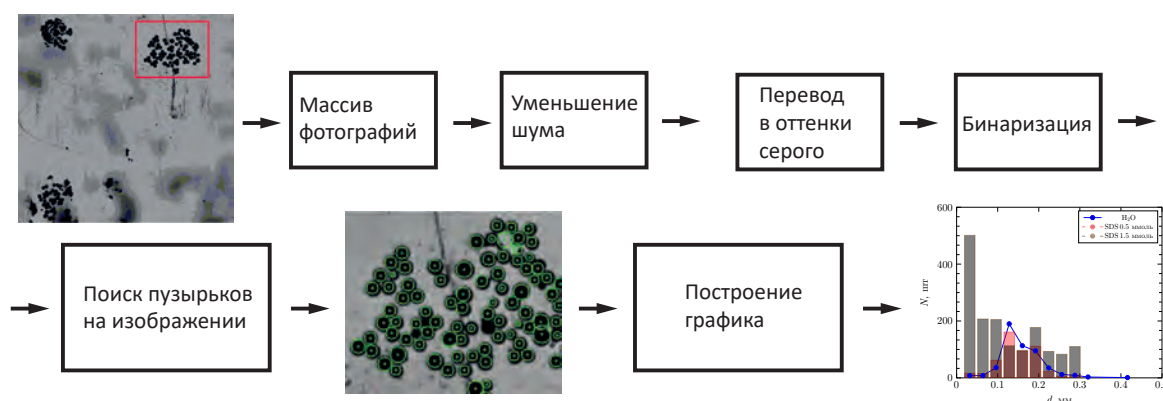


Рисунок 3.3 — Схема визуализации работы программы обработки изображений для определения распределения газовых пузырьков по размерам в исследуемых растворах

Для обработки экспериментальных данных применялась программа, разработанная на языке Python с использованием библиотеки компьютерного зрения OpenCV. Схема визуализации работы программы обработки изображений для определения распределения газовых пузырьков по размерам приведена на рисунке 3.3. Разработанная программа обеспечивала определение количества пузырьков и их диаметров путем анализа экспериментальных фотографий. Обработка изображений включала: (1) предварительную фильтрацию изображений для снижения шумов, (2) пороговую бинаризацию для выделения объектов, (3) морфологический анализ для идентификации отдельных пузырьков и (4) статистическую обработку данных. На основе бинаризованных изображений программа выделяла контуры пузырьков, проводила их подсчет и измерение диаметров, что позволяло получать количественные данные о распределении газовых

включений по размеру в исследуемых растворах в рассматриваемом объеме. Описанная методика генерации и измерения размеров воздушных пузырьков с использованием ультрафильтрационной мембраны и динамической обработки изображений, позволяет определять как диаметр пузырьков (в диапазоне $10 \div 1000 \text{ мкм}$) в растворах SDS и NaCl различной концентрации, так и их количество (от 0 до 1000 единиц на одно изображение).

3.3 Результаты

Результаты эксперимента по генерации пузырьков в дистиллированной воде: без ультразвукового воздействия и при его наличии приведены на рисунке 3.4. В условиях ультразвукового воздействия наблюдается увеличение среднего размера пузырьков и одновременное снижение их общей концентрации в водном растворе. Данный эффект обусловлен интенсификацией взаимодействия между пузырьками под действием ультразвука, что приводит к усилению коалесценции и формированию более крупных газовых включений с одновременным снижением их общего количества.

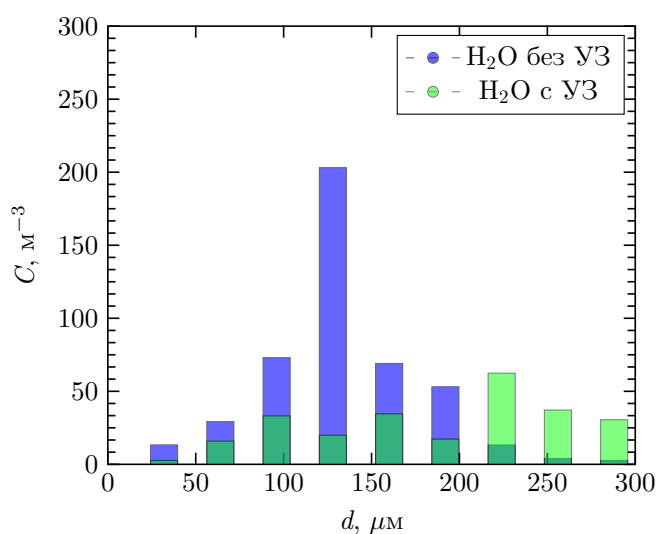


Рисунок 3.4 — Гистограммы распределения пузырьков по размеру в дистиллированной воде

Учитывая, что поверхностно-активные вещества (ПАВ) активно применяются для управления свойствами пузырьков в технологических процессах, следующим этапом исследования стало изучение их поведения в водных растворах. Поверхностно-активные вещества (ПАВ) характеризуются способностью образовывать мицеллы при достижении критической концентрации в растворе. В связи с этим особое значение приобретает исследование поведения конкретного ПАВ — додецилсульфата натрия (SDS) — в процессе генерации газовых пузырьков. Определение критической концентрации мицеллообразования (ККМ) для раствора SDS стало необходимым этапом работы, поскольку при её достижении происходит помутнение раствора, что делает невозможным обработку изображений и как следствие определение распределения газовых пузырьков (Рис. 3.5). Для определения ККМ были применены два независимых метода:

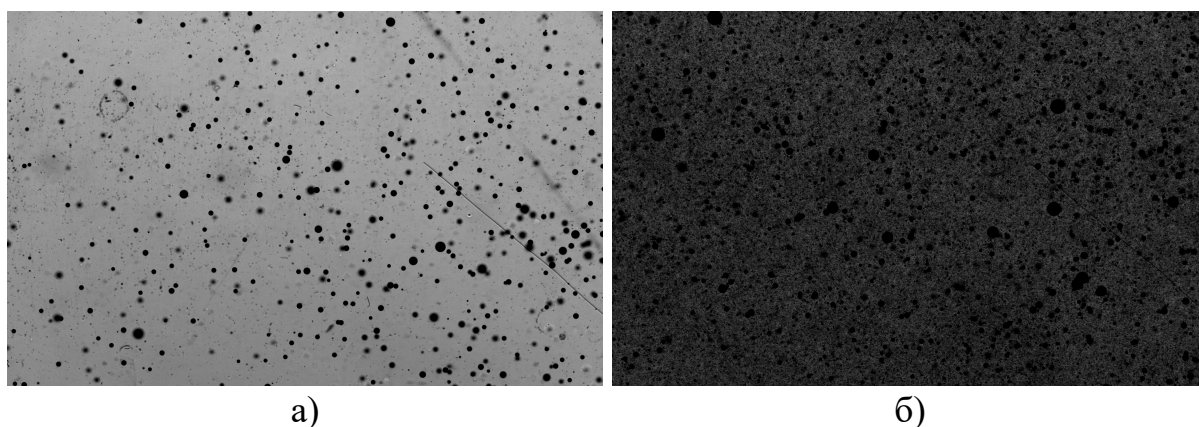


Рисунок 3.5 — Экспериментальные фотографии полученные при концентрации SDS: а) - 1 ммоль/л; б) - 3.5 ммоль/л

кондуктометрический и метод висячей капли. Кондуктометрический метод (Рис. 3.6а) показывает характерную зависимость электропроводности от концентрации SDS. Особое внимание заслуживает точка перегиба на графике, соответствующая концентрации 8.0 ммоль/л. Именно в этой точке наблюдается изменение наклона кривой, что является индикатором достижения критической концентрации мицеллообразования (ККМ) для бидистиллированной воды. Альтернативным методом определения (ККМ) стал метод висячей капли, который основывается на измерении поверхностного натяжения раствора. В ходе экспериментов было

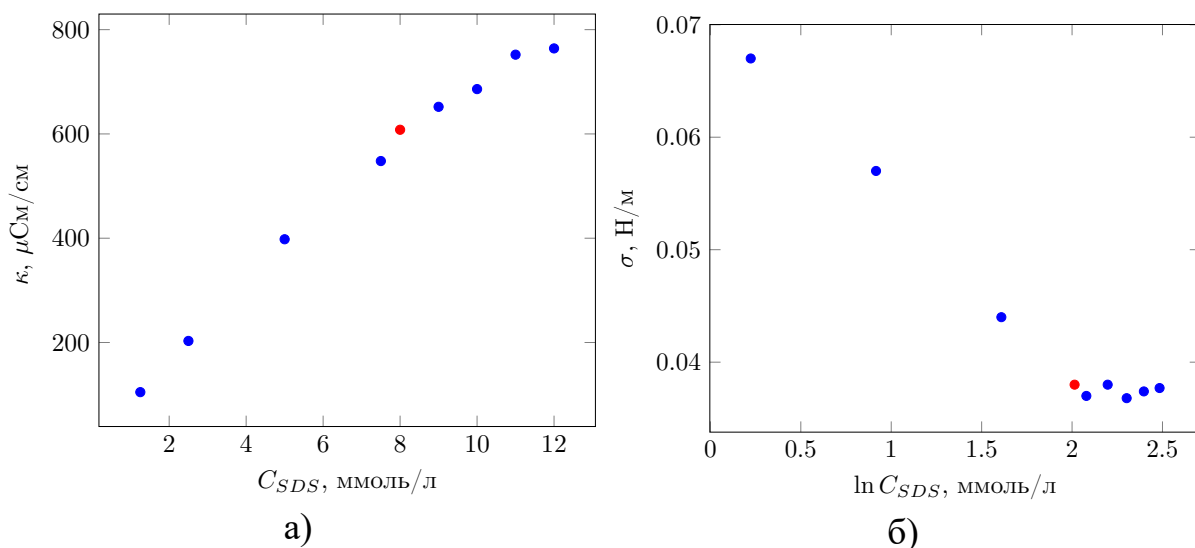


Рисунок 3.6 — а) - График зависимости удельной электропроводности от концентрации; б) - Изотерма поверхностного натяжения в полулогарифмических координатах

установлено, что поверхностное натяжение раствора SDS уменьшается с ростом концентрации ПАВ. Ключевым моментом анализа стало нахождение точки излома на изотерме поверхностного натяжения, представленной в полулогарифмических координатах (Рис. 3.6б). Эта точка соответствует концентрации 7.5 mmol/L для бидистиллированной воды. Сопоставление результатов, полученных двумя методами, позволило определить ККМ раствора SDS в бидистиллированной воде $7.5 \pm 0.5 \text{ mmol}/\text{L}$.

Поскольку природные и технические воды практически всегда содержат соли жёсткости, которые оказывают значительное влияние на физико-химические свойства растворов поверхностно-активных веществ, особую важность приобретает изучение их воздействия на процесс мицеллообразования и, в частности, на величину критической концентрации мицеллообразования (ККМ).

При помощи метода висячей капли были проведены эксперименты с различными водными растворами SDS. Исследования показали, что присутствие солей жёсткости вызывает смещение значения ККМ в сторону меньших концентраций (Рис. 3.7). Данный эффект обусловлен взаимодействием ионов солей с молекулами поверхностно-активных веществ, что существенно влияет на процесс формирования мицелл. Результаты измерений продемонстрировали, что в усло-

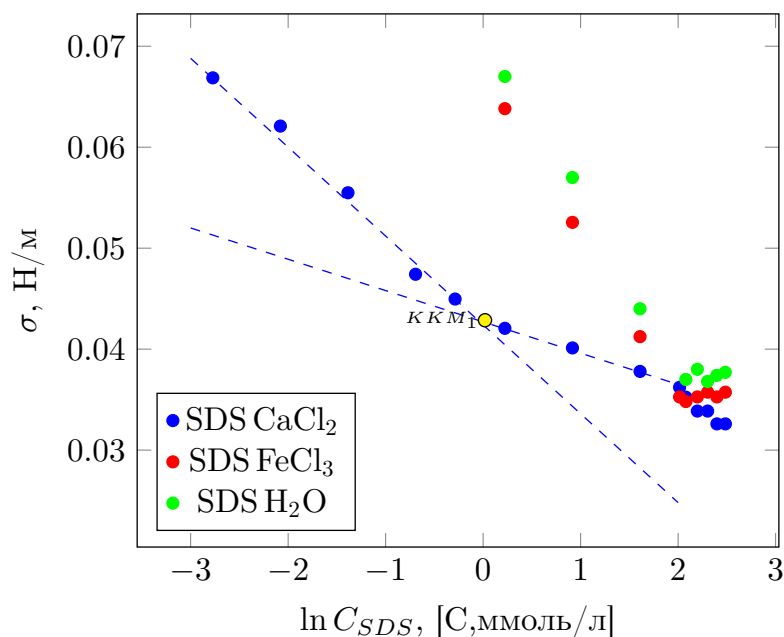


Рисунок 3.7 — Изотерма поверхностного натяжения в полулогарифмических координатах в присутствии солей

виях присутствия солей жёсткости процессы высаливания и начало мицеллообразования фиксируются уже при концентрации SDS 3 ммоль/л. Это обстоятельство определило верхний концентрационный предел для последующих экспериментальных исследований, так как превышение данной концентрации могло бы привести к искажению результатов вследствие активного образования мицелл.

Эксперименты с водными растворами ПАВ SDS в отсутствие ультразвукового воздействия показали изменение характеристик генерируемых пузырьков при варьировании концентрации поверхностно-активного вещества. Как показывают результаты исследования (Рис. 3.8), наблюдается чёткая корреляция между концентрацией SDS и параметрами пузырьков: с ростом концентрации ПАВ в растворе количество пузырьков в зоне съёмки увеличивается, а их средний диаметр, напротив, уменьшается по сравнению с значениями для дистиллированной воды. Механизм данного явления связан с модификацией свойств генерирующей поверхности мелкодисперсной мембраны под действием SDS. Молекулы ПАВ активно взаимодействуют с материалом мембраны, повышая её гидрофильность. В результате этого процесса поверхность становится асимметрично смачиваемой, что существенно влияет на динамику образования и отрыва пузырьков от мем-

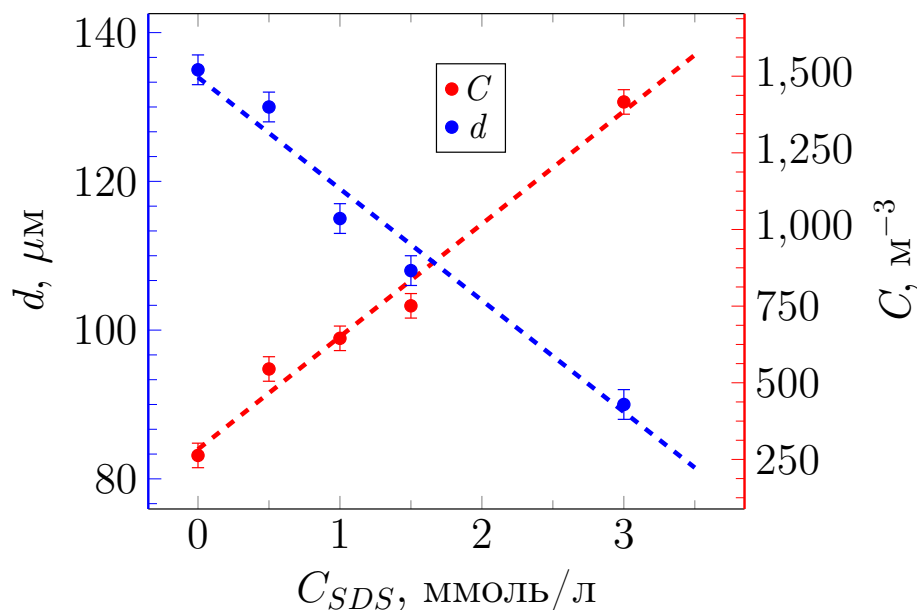


Рисунок 3.8 — Зависимости среднего диаметра и количества пузырьков в зоне съемки от концентрации SDS

браны. Изменённые условия смачивания приводят к формированию более мелких пузырьков, при этом их общее количество возрастает.

Результаты экспериментов с водными растворами SDS представлены на рисунках 3.9, 3.8 и 3.10. На гистограммах синим цветом обозначено распределение пузырьков в зоне видимости по размеру в дистиллированной воде, а столбцы других цветов соответствуют значениям для растворов SDS.

Как видно из графика 3.9а, добавление 1 ммоль/л SDS приводит к увеличению количества пузырьков в жидкости и уменьшению их среднего размера по сравнению с чистой водой. Подобного рода картина наблюдается и для более высоких концентраций SDS, представленных на гистограммах 3.9б, 3.9в. Результаты распределения пузырьков по размеру для различных концентраций SDS представлены на каскадной диаграмме 3.10а и графике 3.8. Как видно из диаграммы 3.10а, при увеличении концентрации SDS от 0 до 3 ммоль/л наблюдается смещение пика гистограмм влево, что свидетельствует об уменьшении размера пузырьков при одновременном увеличении их количества в области наблюдения.

Количественную оценку этого смещения можно проследить на рисунке 3.8, где представлена зависимость размера пузырьков и их среднего диаметра от концентрации SDS. Увеличение концентрации SDS приводит к двум эффектам:

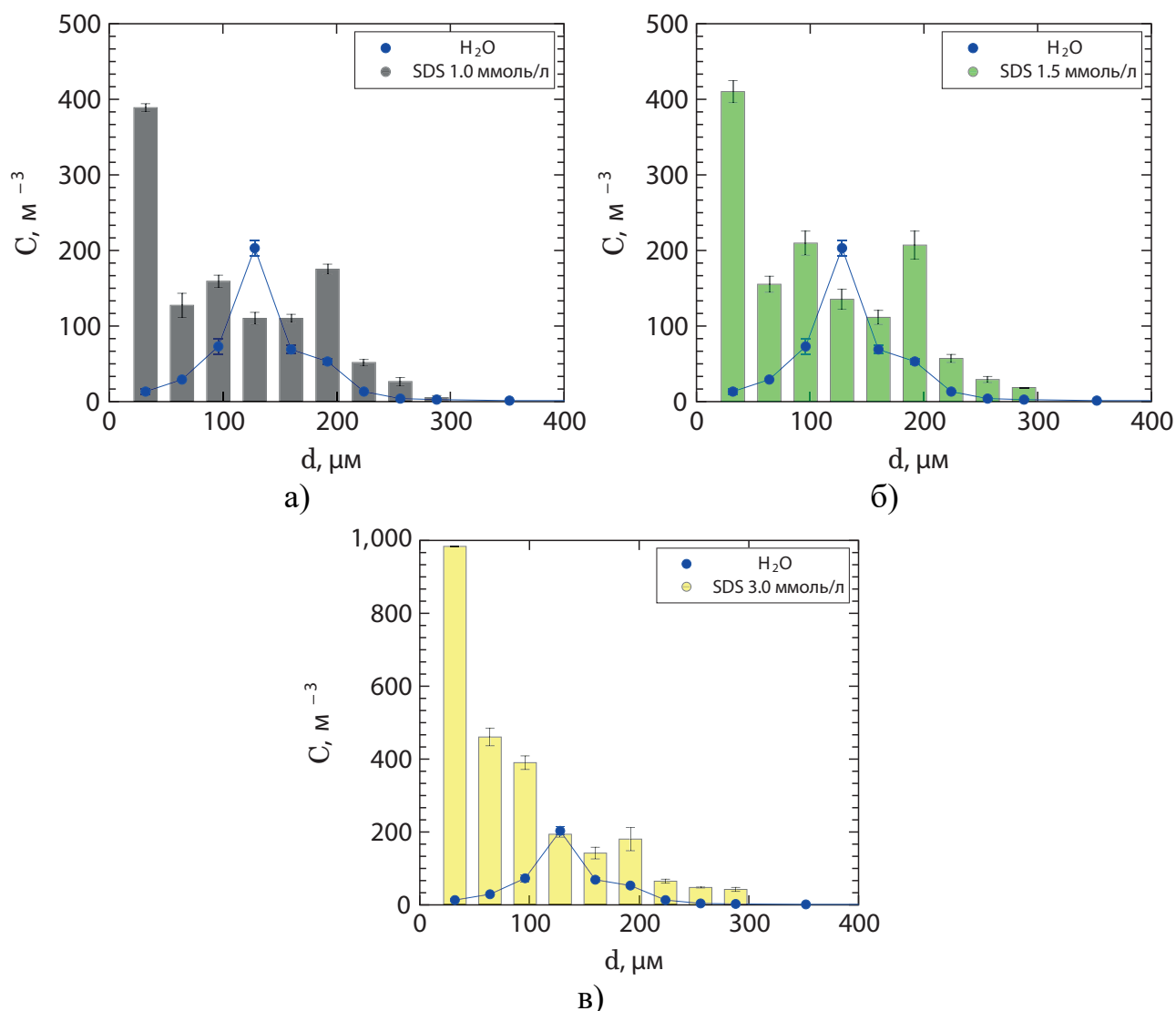


Рисунок 3.9 — Гистограммы распределения пузырьков по размеру при разной концентрации SDS: а) - 1 ммоль/л; б) - 1.5 ммоль/л; в) - 3 ммоль/л

возрастанию количества пузырьков в области съемки (с 263 до 1416 м^{-3}) и уменьшению их среднего диаметра (с 135 до $90 \mu\text{m}$).

При обработке водных растворов ПАВ SDS ультразвуком наблюдается заметное изменение характеристик генерируемых пузырьков в растворе. В частности, количество пузырьков в зоне наблюдения сокращается в среднем примерно в пять раз по сравнению с ситуацией, когда ультразвуковое воздействие отсутствует (Рис. 3.10).

Более того, меняется и размер пузырьков — они становятся крупнее. Это хорошо видно на каскадных диаграммах, которые показывают, как распределяется количество пузырьков по размерам (Рис. 3.10) в области съемки. Видно, что

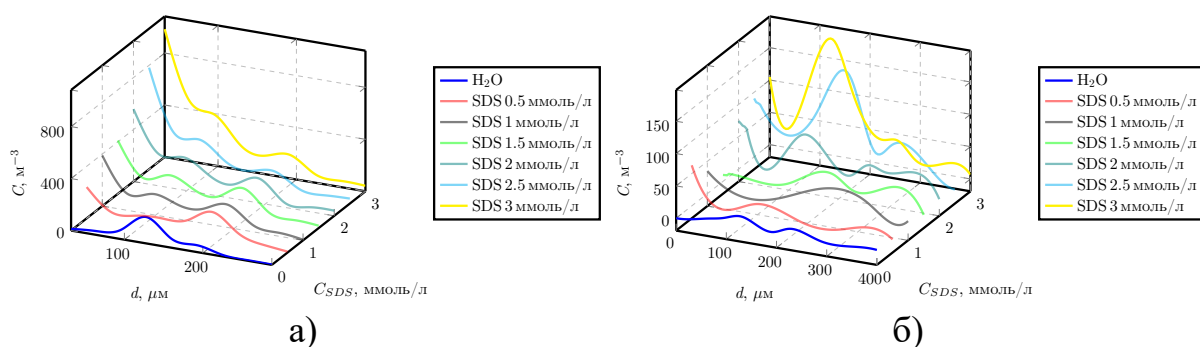


Рисунок 3.10 — Каскадная диаграмма влияния SDS на диаметр и концентрацию пузырьков в жидкости: а) - до ультразвукового воздействия; б) - после ультразвукового воздействия

происходит явное смещение положения главного пика в область более крупных размеров. То есть под влиянием ультразвука происходит существенное увеличение размеров пузырьков — они становятся заметно крупнее по сравнению с теми, что формируются в условиях без применения ультразвука. Такое поведение системы объясняется тем, что ультразвук ускоряет коалесценцию. В результате формируются более крупные газовые включения.

Поскольку флотация сильвинита проводится в условиях высоких концентраций электролитов, следующим этапом исследования стало изучение влияния солей на характеристики пузырьков, генерируемых мембранным методом. Как и в случае с растворами поверхностно-активного вещества SDS, добавление хлорида натрия (NaCl) в воду непосредственно влияет на процесс образования пузырьков, за счет изменения характеристик раствора: из-за появления дополнительных ионов, которые затрудняют движение молекул воды, повышается его вязкость, вследствие усиления межмолекулярного взаимодействия в растворе, увеличивается поверхностное натяжение, из-за образования ионных пар и формирования сольватных оболочек вокруг ионов, снижается диэлектрическая проницаемость.

При сравнении с дистиллированной водой (Рис. 3.11а) прослеживается тенденция к увеличению общего количества генерируемых пузырьков в области съемки. При этом наблюдаемый эффект демонстрирует явную зависимость от концентрации соли — чем выше концентрация NaCl в растворе, тем больше пузырьков образуется (Рис. 3.11а).

Ультразвуковая обработка солевых растворов (NaCl), как показывает каскадная диаграмма (Рис. 3.11б), вызывает эффекты, аналогичные тем, которые наблюдаются в растворах SDS. Под действием ультразвука происходит заметное уменьшение общего количества генерируемых газовых пузырьков в растворе. Это явление также можно объяснить интенсификацией процессов коалесценции. В данном случае добавление соли изменяет скорость распространения ультразвуковых волн в растворе, непосредственно влияя на характер взаимодействий между пузырьками. Это, в свою очередь, способствует более эффективному взаимодействию между пузырьками. Помимо этого, образующиеся в жидкости ионы натрия и хлора создают дополнительные электростатические взаимодействия между пузырьками, что существенно облегчает их агрегацию и способствует более эффективному процессу коалесценции. В результате данного процесса формируются более крупные газовые пузырьки в солевом растворе под действием УЗ.

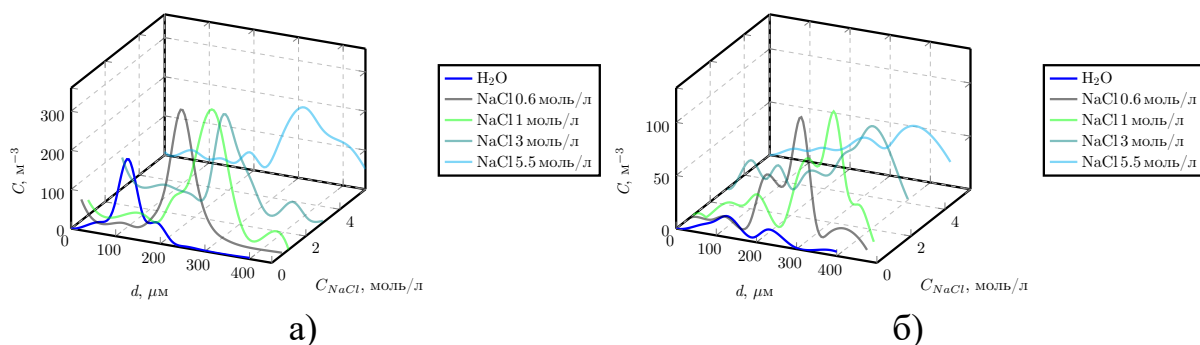


Рисунок 3.11 — Каскадная диаграмма влияния NaCl на диаметр и концентрацию пузырьков в жидкости: а) - до ультразвукового воздействия; б) - после ультразвукового воздействия

В реальных технологических процессах используемые водные растворы зачастую содержат как поверхностно-активные вещества, так и различные соли. Поэтому на следующем этапе исследования рассматривалось комплексное воздействие водных растворов NaCl и SDS на систему в отсутствие ультразвукового воздействия. Как показали эксперименты представленные на рисунке 3.12, добавление хлорида натрия (NaCl) приводит к статистически значимому увеличению

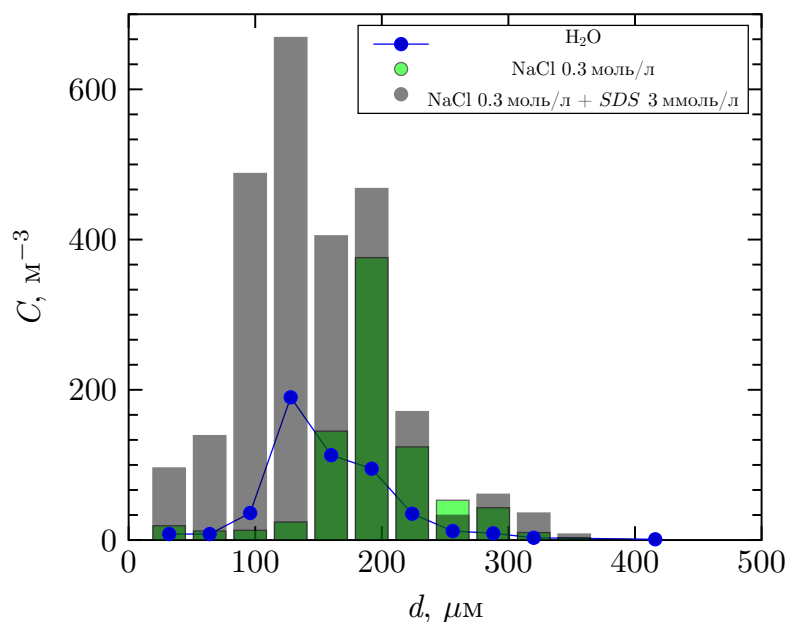


Рисунок 3.12 — Гистограмма распределения пузырьков по размерам в водном растворе 0.3 моль/л NaCl, и смеси 0.3 моль/л NaCl и 3 ммоль/л SDS

объёмной концентрации пузырьков в два раза по сравнению с дистиллированной водой. Это связано с влиянием ионов солей на кинетику образования и отрыва пузырьков от поверхности мембраны. При этом наблюдается увеличение среднего диаметра образующихся пузырьков, что обусловлено повышением поверхностного натяжения раствора. В результате генерируемые пузырьки получают возможность расти до более крупных размеров, сохраняя при этом свою стабильность. Додecilсульфат натрия (SDS) действует как поверхностно-активное вещество, которое снижает поверхностное натяжение раствора. Это препятствует стабилизации пузырьков большого размера — они либо разрушаются, либо делятся на более мелкие. Комбинированное использование SDS и NaCl позволяет достичь оптимального баланса между этими эффектами. Так при концентрации (0.3 моль/л NaCl и 3 ммоль/л SDS) формируется поток пузырьков с диаметром 100 – 200 $\mu\text{м}$. При этом их количество увеличивается в десять раз по сравнению с дистиллированной водой.

Наблюдаемый эффект демонстрирует, что совместное присутствие NaCl и SDS значительно изменяет распределение и характеристики пузырьков по сравнению с системами, содержащими только один из реагентов. Это позволяет

использовать новые возможности для точного контроля параметров пузырьковых систем в различных технологических процессах.

Так как в ряде технологических процессов нежелательно наличие крупных пузырьков в работе была найдена концентрация ПАВ SDS позволяющая нивелировать негативный эффект роста среднего диаметра генерируемых пузырьков. Совместное применение додецилсульфата натрия (SDS) и хлорида натрия (NaCl) позволило определить оптимальный режим генерации пузырьков. При концентрациях 0.3 моль/л NaCl и 3 ммоль/л SDS наблюдалось формирование потока пузырьков диаметром 100 – 200 мкм с десятикратным увеличением их количества по сравнению с дистиллированной водой. Как видно из представленных данных, совместное присутствие NaCl и SDS приводит к эффекту, существенно изменяющему распределение и характеристики пузырьков по сравнению с системами, содержащими только один из реагентов. Данная особенность открывает широкие возможности для целенаправленного управления размером генерируемых пузырьков, что представляет существенный практический интерес для различных технологических приложений.

3.4 Заключение по главе

В данной главе проведено комплексное исследование влияния химических реагентов — анионного поверхностно-активного вещества (додецилсульфата натрия, SDS) и соли (хлорида натрия, NaCl) — на процесс генерации газовых пузырьков флотационного размера в водных растворах, с помощью кварцевой ультрафильтрационной мембраны в том числе при наличии ультразвукового воздействия.

Показано, что ультразвуковое воздействие на дистиллированную воду при генерации газовых пузырьков с использованием кварцевой ультрафильтрационной мембраны приводит к существенному изменению характеристик образу-

щихся пузырьков: наблюдается увеличение среднего диаметра пузырьков при одновременном снижении их общей концентрации в растворе.

Эксперименты показали, что при увеличении концентрации SDS в диапазоне от 0.5 до 3 ммоль/л наблюдается значительное возрастание общего количества генерируемых газовых пузырьков с одновременным уменьшением их среднего диаметра. Ультразвуковое воздействие на такую систему вызывает противоположный эффект: происходит существенное снижение общего количества пузырьков в растворе при увеличении их среднего размера.

Обнаружено, что в растворах хлорида натрия (NaCl) наблюдаются схожие, но менее выраженные изменения характеристик образующихся пузырьков по сравнению с растворами SDS. При увеличении концентрации соли в диапазоне от 0.5 до 5.5 моль/л наблюдается рост общего количества генерируемых пузырьков по сравнению с дистиллированной водой. При ультразвуковом воздействии в данных условиях отмечается существенное снижение количества генерируемых пузырьков по сравнению с экспериментами без ультразвукового воздействия, что связано с интенсификацией коалесценции.

Установлено явление компенсации взаимного влияния хлорида натрия (NaCl) и додецилсульфата натрия (SDS) на распределение газовых пузырьков по размерам при определённых концентрациях реагентов. При концентрации NaCl 0.3 моль/л и SDS 3 ммоль/л, наблюдается компенсация взаимного влияния соли и ПАВ на распределение пузырьков по размерам. Механизм данного явления обусловлен противоположным действием реагентов на характеристики образующихся пузырьков: NaCl способствует формированию более крупных пузырьков за счёт повышения поверхностного натяжения раствора, в то время как SDS препятствует стабилизации пузырьков большого размера, способствуя их делению на более мелкие. При этом форма гистограммы распределения пузырьков по размерам качественно соответствует распределению для чистой воды, однако количественные показатели демонстрируют существенное отличие — наблюдается десятикратное увеличение общего числа генерируемых пузырьков. Данный факт свидетельствует о наличии выраженного эффекта при совместном действии NaCl

и SDS в исследуемой системе, что открывает перспективы для практического применения данного эффекта в технологических процессах.

Практическая значимость работы заключается в разработке методов управления параметрами пузырьков, генерируемых мембранным методом. Установлено, что комбинированное использование хлорида натрия (NaCl) и додецилсульфата натрия (SDS) позволяет целенаправленно регулировать характеристики пузырьков - уменьшать их средний диаметр и значительно увеличивать концентрацию в системе, сохраняя при этом распределение по размерам, близкое к распределению в чистой воде. Эти результаты имеют непосредственное практическое значение для колонной флотации, где увеличение количества пузырьков флотационного размера критически важно для повышения эффективности процесса, а также позволяют рассматривать возможность применения оборотной воды, минуя дорогостоящий этап её обессоливания.

С другой стороны, обнаруженный эффект увеличения размеров пузырьков под ультразвуковым воздействием может быть использован для интенсификации массообменных процессов в барботажных системах, где требуются пузыри увеличенного размера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования:

1. Разработан, апробирован и применен метод исследования пространственно-временного распределения активности кавитационных событий в сонохимическом реакторе, основанный на анализе тепловых карт разрушения алюминиевой фольги.
2. Исследовано распределение кавитационной активности в сонохимическом 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 слойки между ним и пластиной. 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 мембраны 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.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

Проведенные исследования демонстрируют высокую эффективность ультразвукового воздействия для управления процессами в жидкости с пузырьками, такими как кавитация, смачиваемость поверхностей и генерация пузырьков. Перспективными направлениями для дальнейших исследований являются: изучение воздействия ультразвука на реальные флотационные пульпы с минеральными частицами; оптимизация параметров ультразвуковой обработки (частоты, мощности, времени экспозиции) для конкретных технологических задач, таких как обогащение труднофлотируемых руд или очистка сточных вод. Фундаментальный интерес представляет детальное исследование механизмов необратимого изменения смачиваемости под действием ультразвука. Полученные результаты открывают широкие перспективы для разработки новых ресурсосберегающих технологий во флотационном обогащении руд, сонохимии, водоочистке и других областях, где требуется эффективное управление поведением газовых пузырьков и взаимодействием фаз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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>.
2. 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>.
3. 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>.
4. 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>.
5. 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>.
6. 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>.
7. **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>.**
 8. **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>.**
 9. *Mason, T. J.* The uses of ultrasound in food technology / T. J. Mason, L. Paniwnyk, J. Lorimer // *Ultrasonics sonochemistry*. — 1996. — Vol. 3, no. 3. — S253—S260. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135041779600034X>.
 10. Fundamental and applied aspects of ultrasonics and sonochemistry / B. G. Pollet, M. Ashokkumar, B. G. Pollet, M. Ashokkumar // *Introduction to ultrasound, sonochemistry and sonoelectrochemistry*. — 2019. — P. 1—19. — URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-25862-7_1.
 11. *Маргулис, М.* Основы звукохимии (химические реакции в звуковых полях) / М. Маргулис // М.: Высш. шк. — 1984. — URL: https://www.studmed.ru/margulis-ma-zvukohimicheskie-reakcii-i-sonoluminescenciya_6939ca4e8ea.html.
 12. *Gogate, P. R.* Sonochemical reactors / P. R. Gogate, P. N. Patil ; ed. by J. C. Colmenares, G. Chatel. — Cham : Springer International Publishing, 2017. — P. 255—281. — URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-54271-3_10.

13. *Thornycroft, J. I.* Torpedo-boat destroyers / J. I. Thornycroft, S. W. Barnaby // Minutes of the proceedings of the Institution of Civil Engineers. — Thomas Telford-ICE Virtual Library, 1895. — С. 51—69.
14. *Brohult, S.* Splitting of the hæmocyanin molecule by ultrasonic waves / S. Brohult // Nature. — 1937. — Vol. 140. — P. 805. — URL: <https://doi.org/10.1038/140805a0> (visited on 09/24/2025).
15. *Frenzel, H.* Luminescenz im ultraschallbeschickten Wasser / H. Frenzel, H. Schultes // Zeitschrift für Physikalische Chemie. — 1934. — Vol. 27B, no. 1. — P. 421—424. — URL: <https://doi.org/10.1515/zpch-1934-2737>.
16. *Weiss, J.* Radiochemistry of aqueous solutions / J. Weiss // Nature. — 1944. — Vol. 153. — P. 748—750.
17. *Parke, A. V. M.* The chemical action of ultrasonic waves / A. V. M. Parke, D. Taylor // Journal of the Chemical Society (Resumed). — 1956. — P. 4442—4450.
18. *Ганиев, Р. Ф.* Нелинейная волновая механика и технологии: волновые и колебательные явления в основе высоких технологий / Р. Ф. Ганиев, Л. Е. Украинский. — 2-е изд. — Москва, 2011. — С. 780.
19. Multi-Objective Optimization of Forth Flotation Process: An Application in Gold Ore / W. Zhang, Q. Yuan, S. Jia, Z. Li, X. Yin // Sustainability. — 2021. — Vol. 13, no. 15. — P. 8314. — URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/15/8314>.
20. Use of mining tailings or their sedimentation and flotation fractions in a mixture with soil to produce structural ceramics / I. B. C. Amaral, L. C. D. Cavalcante, J. D. Fabris, B. V. Prat, A. B. Reis // Sustainability. — 2021. — Vol. 13, no. 2. — P. 911. — URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/2/911>.
21. *Нигматулин, Р. И.* Основы механики гетерогенных сред / Р. И. Нигматулин. — Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1978.
22. *Lorimer, T. J. M. P.* Uses of power ultrasound in chemistry and processing / T. J. M. P. Lorimer // Applied sonochemistry. — 2002.

23. *Киенко, Л. А.* Флотация флюоритовых руд с предварительной обработкой пульпы ультразвуком / Л. А. Киенко, О. В. Воронова // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов. — 2014. — С. 144—149. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23814071>.
24. *Розенберг, Л. Д.* Физика и техника мощного ультразвука. Книга 3. Физические основы ультразвуковой технологии. Т. 3 / Л. Д. Розенберг. — Москва : Наука, 1970. — С. 586—598. — (Физика и техника мощного ультразвука).
25. Intensification of the flotation separation of potash ore using ultrasound treatment / L. O. Filippov, I. V. Filippova, O. Barres, T. P. Lyubimova, O. O. Fattalov // Minerals Engineering. — 2021. — Vol. 171. — P. 107092.
26. *Блехман, И. И.* Вибрационная механика и вибрационная реология (теория и приложения) / И. И. Блехман. — М. : Физматлит, 2018. — С. 752.
27. Motion of Gas Bubbles and Rigid Particles in Vibrating Fluid-Filled Volumes / I. Blekhman, L. Blekhman, V. Sorokin, L. Vaisberg, V. Vasilkov, K. Yakimova // Procedia IUTAM. — 2013. — Т. 8. — С. 43—50. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210983813000801> ; IUTAM Symposium on Waves in Fluids: Effects of Nonlinearity, Rotation, Stratification and Dissipation.
28. *Любимов, Д. В.* Динамика поверхностей раздела в вибрационных полях / Д. В. Любимов, Т. П. Любимова, А. А. Черепанов. — Физматлит, 2003.
29. The interaction of a rising bubble and a particle in oscillating fluid / D. V. Lyubimov, L. S. Klimenko, T. P. Lyubimova, L. O. Filippov // Journal of Fluid Mechanics. — 2016. — Т. 807. — С. 205—220.
30. *Коновалов, В. В.* Численное исследование влияния вибраций на взаимодействие в ансамбле газовых пузырьков и твердых частиц в жидкости / В. В. Коновалов, Т. П. Любимова // Вычислительная механика сплошных сред. — 2019. — Т. 12, № 1. — С. 48—56.
31. *Коновалов, В. В.* Взаимодействие газового пузыря и твердой частицы в жидкости под действием акустических вибраций / В. В. Коновалов,

- Т. П. Любимова, С. А. Прокопьев // Вычислительная механика сплошных сред. — 2023. — Т. 16, № 2. — С. 141—149.
32. *Klimenko, L.* Resonance and surfactant effects on the interaction of a rising bubble and a sedimenting particle in an oscillating fluid / L. Klimenko, T. Lyubimova // *Physics of Fluids*. — 2024. — Т. 36, № 10.
 33. *Голямина, И.* Ультразвук, Маленькая энциклопедия, / И. Голямина. — Москва : Советская энциклопедия, 1979.
 34. *Бергман, Л.* Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман. — Москва : Издательство иностранной литературы, 1957.
 35. *Губайдуллин, Д. А.* Акустические волны в многофракционных пузырьковых жидкостях / Д. А. Губайдуллин, А. А. Никифоров, Р. Н. Гафиятов // *Теплофизика высоких температур*. — 2015. — Т. 53, № 2. — С. 250—255.
 36. *Губайдуллин, Д.* Особенности отражения акустических волн от границы или слоя двухфазной среды / Д. Губайдуллин, Ю. Федоров // *Акустический журнал*. — 2018. — Т. 64, № 2. — С. 162—173.
 37. *Hamza, F.* Sonochemical reactor characterization in the presence of cylindrical and conical reflectors / F. Hamza, O. Hamdaoui, C. Pétrier // *Ultrasonics Sonochemistry*. — 2023. — Aug. — Vol. 99. — P. 106556.
 38. *Sprawls, P.* Physical principles of medical imaging / P. Sprawls. — Wisconsin : Medical Physics Publishing, 1993. — URL: <https://pid.emory.edu/ark:/25593/s4h1r>.
 39. Experimental study of formation and dynamics of cavitation bubbles and acoustic flows in NaCl, KCl water solutions / K. Rybkin, Y. Bratukhin, T. Lyubimova, O. Fatallov, L. Filippov // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2017. — July. — Vol. 879, no. 1. — P. 012026. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/879/1/012026>.

40. *Меттер, И.* Физическая природа кавитации и механизм кавитационных повреждений / И. Меттер // Успехи физических наук. — 1948. — Т. 35, № 5. — С. 52—79. — URL: <https://www.ufn.ru/ru/articles/1948/5/c/>.
41. *Рой, Н.* Возникновение и протекание ультразвуковой кавитации / Н. Рой // Акустический журнал. — 1957. — Т. 3, № 1. — С. 3—18.
42. Studies of the cavitation effects of clinical ultrasound by sonoluminescence: 2. Thresholds for sonoluminescence from a therapeutic ultrasound beam and the effect of temperature and duty cycle / M. Pickworth, P. Dendy, T. Leighton, A. Walton // Physics in Medicine & Biology. — 1988. — Vol. 33, no. 11. — P. 1249.
43. Dependence of cavitation, chemical effect, and mechanical effect thresholds on ultrasonic frequency / T. Thanh Nguyen, Y. Asakura, S. Koda, K. Yasuda // Ultrasonics Sonochemistry. — 2017. — Vol. 39. — P. 301—306. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417717302018>.
44. *Богуславский, Ю.* К вопросу о пороге кавитации и его зависимости от частоты / Ю. Богуславский, В. Корец // Акуст. ж. — 1966. — № 4. — С. 416—421.
45. *Бабилов, О. И.* Ультразвук и его применение в промышленности / О. И. Бабилов. — М. : Наука, 1958.
46. Mitigating cavitation erosion using biomimetic gas-entrapping microtextured surfaces (GEMS) / S. R. Gonzalez-Avila, D. M. Nguyen, S. Arunachalam, E. M. Domingues, H. Mishra, C.-D. Ohl // Science Advances. — 2020. — Vol. 6, no. 13. — eaax6192. — eprint: <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/sciadv.aax6192>. — URL: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/sciadv.aax6192>.
47. *Zhou, Y.-K.* Vibratory cavitation erosion in aqueous solutions / Y.-K. Zhou, F. Hammit // Wear. — 1983. — Vol. 87, no. 2. — P. 163—171. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0043164883900315>.

48. Физика ультразвуковой интенсификации массообмена для решения экологических проблем и получения новых материалов: теория, эксперимент, приложения / Р. Н. Голых, В. Н. Хмелёв, Ж.-Б. Карра, И. А. Маняхин, В. Мишков, А. Р. Барсуков // Физико-технические проблемы добычи, транспорта и переработки органического сырья в условиях холодного климата. — 2024. — № 1. — С. 175—179.
49. Повышение эффективности ультразвуковой кавитационной обработки вязких и дисперсных жидких сред / В. Хмелев, С. Хмелев, Р. Голых, Р. Барсуков // Ползуновский вестник. — 2010. — № 3. — С. 321—325.
50. Thermodynamics of ultra-sonic cavitation bubbles in flotation ore processes / J. J. Royer, N. Monnin, N. Pailot-Bonnetat, L. O. Filippov, I. V. Filippova, T. Lyubimova // Journal of Physics: Conference Series. — 2017. — Июль. — Т. 879, № 1. — С. 012024. — URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/879/1/012024>.
51. Исследование процесса флотации в пневматической флотационной машине типа «Реактор-сепаратор» / В. Самыгин, Л. Филиппов, Ю. Рогачев, В. Филиппов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2006. — № 11. — С. 364—368.
52. Филиппов, Л. О. Повышение кинетики флотации в многозонной флотационной машине типа реактор-сепаратор под влиянием импульсных воздействий в проточном режиме / Л. О. Филиппов, А. С. Матинин, Ч. А. Лехатинов // Горный журнал. — 2012. — № 9. — С. 102—106.
53. Чернышев, А. Перспективы применения ультразвука на стадии пенной флотации (флотационное обесшламливание) в процессе переработки сильвинита / А. Чернышев, М. Черепанова // Химия. Экология. Урбанистика. — 2020. — Т. 2020. — С. 209—213.
54. Копылова, А. Е. Применение ультразвуковых воздействий при переработке золотосодержащих хвостов методом комбинированной

- пневмо-электрофлотации / А. Е. Копылова, К. В. Прохоров // Проблемы недропользования. — 2023. — 2 (37). — С. 14—22.
55. *Wei, Z.* Combining COMSOL modeling with acoustic pressure maps to design sono-reactors / Z. Wei, L. K. Weavers // *Ultrasonics Sonochemistry*. — 2016. — Т. 31. — С. 490—498. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417716300360>.
 56. Effect of thermal treatment and erosion aggressiveness on resistance of S235JR steel to cavitation and slurry / A. K. Krella, D. E. Zakrzewska, M. H. Buszko, A. Marchewicz // *Materials*. — 2021. — Vol. 14, no. 6. — P. 1456.
 57. Sonochemical activity in ultrasonic reactors under heterogeneous conditions / A. Barchouchi, S. Molina-Boisseau, N. Gondrexon, S. Baup // *Ultrasonics Sonochemistry*. — 2021. — Vol. 72. — P. 105407.
 58. *Tan, K.* Bubble dynamics and cavitation intensity in milli-scale channels under an ultrasonic horn / K. Tan, S. Yeo // *Ultrasonics Sonochemistry*. — 2019. — Vol. 58. — P. 104666.
 59. Quantification of cavitation activity by sonoluminescence to study the sonocrystallization process under different ultrasound parameters / J. Lee, K. Yasui, M. Ashokkumar, S. E. Kentish // *Crystal Growth & Design*. — 2018. — Vol. 18, no. 9. — P. 5108—5115.
 60. Effect of cavitation intensity control on self-assembling of alkanethiols on gold in room temperature ionic liquids / B. Naidji, L. Hallez, A. E. Taouil, M. Rebetez, J. Hihn // *Ultrasonics Sonochemistry*. — 2021. — Vol. 75. — P. 105610.
 61. Trimodality cavitation mapping in shock wave lithotripsy / M. Li, G. Sankin, T. Vu, J. Yao, P. Zhong // *The Journal of the Acoustical Society of America*. — 2021. — Vol. 149, no. 2. — P. 1258—1270.
 62. Comparison of two different ultrasound reactors for the treatment of cellulose fibers / T. R. K. Pamidi, Ö. Johansson, T. Löfqvist, V. Shankar // *Ultrasonics sonochemistry*. — 2020. — Vol. 62. — P. 104841.

63. Sonochemistry and its dosimetry / Y. Iida, K. Yasui, T. Tuziuti, M. Sivakumar // *Microchemical Journal*. — 2005. — Vol. 80, no. 2. — P. 159—164.
64. Ultrasound-enhanced hair dye application for natural dyeing formulations / V. Gonzalez, R. Wood, J. Lee, S. Taylor, M. Bussemaker // *Ultrasonics Sonochemistry*. — 2019. — Vol. 52. — P. 294—304.
65. A standard method to calibrate sonochemical efficiency of an individual reaction system / S. Koda, T. Kimura, T. Kondo, H. Mitome // *Ultrasonics sonochemistry*. — 2003. — Vol. 10, no. 3. — P. 149—156.
66. Acoustic characterization of cavitation intensity: A review / P. Wu, X. Wang, W. Lin, L. Bai // *Ultrasonics Sonochemistry*. — 2022. — Vol. 82. — P. 105878.
67. Effect of ultrasonic cavitation on measurement of sound pressure using hydrophone / T. T. Nguyen, Y. Asakura, N. Okada, S. Koda, K. Yasuda // *Japanese Journal of Applied Physics*. — 2017. — Vol. 56, 7S1. — 07JE06.
68. *Kang, C.* Estimation of aggressive intensity of a cavitating jet with multiple experimental methods / C. Kang, H. Liu, H. Soyama // *Wear*. — 2018. — Vol. 394. — P. 176—186.
69. *Pugin, B.* Qualitative characterization of ultrasound reactors for heterogeneous sonochemistry / B. Pugin // *Ultrasonics*. — 1987. — Vol. 25, no. 1. — P. 49—55.
70. Characterisation of measures of reference acoustic cavitation (COMORAC): an experimental feasibility trial / T. G. Leighton, P. R. Birkin, M. Hodnett, B. Zeqiri, J. F. Power, G. J. Price, T. Mason, M. Plattes, N. Dezhkunov, A. J. Coleman // *Bubble and Particle Dynamics in Acoustic Fields: Modern Trends and Applications* / ed. by A. Doinikov. — Research Signpost, 2005. — P. 37—94.
71. *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>.

72. Investigation on Ultrasonic Cavitation Erosion of Aluminum–Titanium Alloys in Sodium Chloride Solution / J. Zhao, L. Ning, J. Zhu, Y. Li // *Crystals*. — 2021. — Vol. 11, no. 11. — P. 1299.
73. *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>.
74. Chemically controlled megasonic cleaning of patterned structures using solutions with dissolved gas and surfactant / B. N. Sahoo, S. Y. Han, H.-T. Kim, K. Ando, T.-G. Kim, B.-K. Kang, A. Klipp, N. P. Yerriboina, J.-G. Park // *Ultrasonics Sonochemistry*. — 2022. — Vol. 82. — P. 105859. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417721004016>.
75. A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation / Y. Chen, V. N. Truong, X. Bu, G. Xie // *Ultrasonics sonochemistry*. — 2020. — Vol. 60. — P. 104739.
76. *Chen, C.-T.* Speed of sound in NaCl, MgCl₂, Na₂SO₄, and MgSO₄ aqueous solutions as functions of concentration, temperature, and pressure / C.-T. Chen, L.-S. Chen, F. J. Millero // *The Journal of the Acoustical Society of America*. — 1978. — Vol. 63, no. 6. — P. 1795–1800. — eprint: https://pubs.aip.org/asa/jasa/article-pdf/63/6/1795/11639452/1795_1_online.pdf. — URL: <https://doi.org/10.1121/1.381917>.
77. *Под ред. Б. П. Никольского.* Справочник химика. Т. 1 / Под ред. Б. П. Никольского. — 2-е испр. — Ленинград-Москва : Химия, 1963. — 1072 с.
78. Effect of NaCl and CO₂ on the inception control of hydrodynamic cavitation by gas solubility change / M. Li, R. Manica, B. Xiang, Q. Liu // *Chemical Engineering Science*. — 2021. — Vol. 246. — P. 116997.

79. Dissolved gas and ultrasonic cavitation – A review / J. Rooze, E. V. Rebrov, J. C. Schouten, J. T. Keurentjes // *Ultrasonics Sonochemistry*. — 2013. — Vol. 20, no. 1. — P. 1—11. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417712000910>.
80. 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>.
81. Effect of surfactants on inertial cavitation activity in a pulsed acoustic field / J. Lee, S. Kentish, T. J. Matula, M. Ashokkumar // *The Journal of Physical Chemistry B*. — 2005. — Vol. 109, no. 35. — P. 16860—16865.
82. *Shaw, D. B.* Surface bubble coalescence / D. B. Shaw, L. Deike // *Journal of Fluid Mechanics*. — 2021. — T. 915. — A105.
83. *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.
84. Effects of sodium dodecyl sulfate on a single cavitation bubble / Q. Wang, W.-Z. Chen, X. Wang, T.-Y. Zhao // *Chinese Physics Letters*. — 2018. — Vol. 35, no. 8. — P. 084302.
85. *Chen, Y.-J.* Diagnosis of oxide films by cavitation micro-jet impact / Y.-J. Chen, L.-W. Huang, T.-S. Shih // *Materials Transactions*. — 2003. — Vol. 44, no. 2. — P. 327—335.
86. *Abdullah, A.* On the impact of ultrasonic cavitation bubbles / A. Abdullah, M. Malaki, E. Baghizadeh // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. — 2012. — Vol. 226, no. 3. — P. 681—694.

87. *Eskin, D. G.* Application of a plate sonotrode to ultrasonic degassing of aluminum melt: Acoustic measurements and feasibility study / D. G. Eskin, K. Al-Helal, I. Tzanakis // *Journal of Materials Processing Technology*. — 2015. — Vol. 222. — P. 148—154.
88. *Ohl, S.-W.* Bubbles with shock waves and ultrasound: a review / S.-W. Ohl, E. Klaseboer, B. C. Khoo // *Interface focus*. — 2015. — Vol. 5, no. 5. — P. 20150019.
89. Aluminum foil test method for performance of ultrasonic cleaner : CN102042871A / S. Junzhong, Z. Haipeng, G. Mingtao, Y. Ying, L. Jinhui, L. Jia. — 11/2010.
90. 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>.
91. Ultrasound-driven design of metal surface nanofoams / E. V. Skorb, D. G. Shchukin, H. Möhwald, D. V. Andreeva // *Nanoscale*. — 2010. — Vol. 2, no. 5. — P. 722—727.
92. *Гималтдинов, И. К.* Динамика звуковых волн в насыщенных парогазовой смесью пористых средах / И. К. Гималтдинов, В. Л. Дмитриев, Л. Ф. Ситдикова // *Теплофизика высоких температур*. — 2014. — Т. 52, № 4. — С. 572—580.
93. *Емельяненко, А. М.* Анализ смачивания как эффективный метод изучения характеристик покрытий, поверхностей и происходящих на них процессов (Обзор) / А. М. Емельяненко, Л. Б. Бойнович // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. — 2010. — Т. 76, № 9. — С. 27—36.
94. *Дерягин, Б. В.* Микрофлотация: водоочистка, обогащение / Б. В. Дерягин, С. С. Духин, Н. Н. Рулев. — 1986.

95. *Дерягин, Б. В.* Адгезия твердых тел / Б. В. Дерягин, Н. А. Кротова, В. П. Смилга. — Москва : Наука, 1973.
96. *Мелик-Гайказян, В.* Методы решения задач теории и практики флотации / В. Мелик-Гайказян, Н. Емельянова, Т. Юшина. — ЛитРес, 2017.
97. *Калмыков, В. В.* Способы оценки краевого угла методом лежащей капли / В. В. Калмыков, Е. А. Медведева, Р. А. Конозобко // Электронный журнал: наука, техника и образование. — 2020. — № 1. — С. 51—56.
98. *Extrand, C.* Uncertainty in contact angle measurements from the tangent method / C. Extrand // Journal of adhesion science and Technology. — 2016. — Vol. 30, no. 15. — P. 1597—1601.
99. *Zhao, T.* Contact angle measurement of natural materials / T. Zhao, L. Jiang // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. — 2018. — Vol. 161. — P. 324—330. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927776517307063>.
100. *Krasowska, M.* Wetting films in attachment of the colliding bubble / M. Krasowska, K. Malysa // Advances in Colloid and Interface Science. — 2007. — Vol. 134/135. — P. 138—150. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001868607000760> ; Surface forces: wetting phenomena, membrane separation, rheology. Topical issue in honour of Victor Starov.
101. *Manev, E. D.* Critical thickness of microscopic thin liquid films / E. D. Manev, A. V. Nguyen // Advances in colloid and interface science. — 2005. — Vol. 114. — P. 133—146.
102. *Krasowska, M.* Kinetics of bubble collision and attachment to hydrophobic solids: I. Effect of surface roughness / M. Krasowska, K. Malysa // International Journal of Mineral Processing. — 2007. — Vol. 81, no. 4. — P. 205—216.
103. Thin liquid film drainage mechanism for bubble–particle attachment interactions in the low-rank coal flotation in the presence of salt and surfactants / R. Li, Z. Xie, Y. Zhou, W. Wang, X. Gui // Journal of Molecular Liquids. — 2024. —

- Vol. 398. — P. 124236. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167732224002927>.
104. *Bjerknes, V.* Fields of Force / V. Bjerknes. — New York : Columbia University Press, 1906.
 105. *Жуковский, Н.* Собрание сочинений. Гидродинамика / Н. Жуковский. — Москва : ЦАГИ, 1935.
 106. *Crum, L. A.* Bjerknes forces on bubbles in a stationary sound field / L. A. Crum // The Journal of the Acoustical Society of America. — 1975. — June. — Vol. 57, no. 6. — P. 1363—1370. — eprint: https://pubs.aip.org/asa/jasa/article-pdf/57/6/1363/11595163/1363_1_online.pdf. — URL: <https://doi.org/10.1121/1.380614>.
 107. *Plesset, M. S.* The dynamics of cavitation bubbles / M. S. Plesset. — 1949.
 108. *Brennen, C. E.* Cavitation and bubble dynamics / C. E. Brennen. — USA : Cambridge university press, 2014. — URL: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107338760>.
 109. *Bjerknes, V.* Die Kraftfelder / V. Bjerknes. — Michigan : University of Michigan Library, 1909.
 110. *Zhang, Y.* The secondary Bjerknes force between two gas bubbles under dual-frequency acoustic excitation / Y. Zhang, S. Li // Ultrasonics Sonochemistry. — 2016. — Vol. 29. — P. 129—145.
 111. *Yoshida, K.* Experimental investigation on reversal of secondary Bjerknes force between two bubbles in ultrasonic standing wave / K. Yoshida, T. Fujikawa, Y. Watanabe // The Journal of the Acoustical Society of America. — 2011. — Vol. 130, no. 1. — P. 135—144.
 112. Experimental and theoretical analysis of secondary Bjerknes forces between two bubbles in a standing wave / J. Jiao, Y. He, S. E. Kentish, M. Ashokkumar, R. Manasseh, J. Lee // Ultrasonics. — 2015. — Vol. 58. — P. 35—42.

113. *Заболотская, Е. А.* Взаимодействие газовых пузырьков в звуковом поле / Е. А. Заболотская // Акустический журнал. — 1984. — Т. 30, № 5. — С. 365—368.
114. Dynamics of two interacting acoustic bubbles at short separation distances / G. Regnault, A. A. Doinikov, C. Mauger, P. Blanc-Benon, C. Inserra // *Physics of Fluids*. — 2023. — Mar. — Vol. 35, no. 3. — P. 037116. — eprint: https://pubs.aip.org/aip/pof/article-pdf/doi/10.1063/5.0135370/19826156/037116_1_online.pdf. — URL: <https://doi.org/10.1063/5.0135370>.
115. *Сандулян, Ш. В.* Асимптотические и численные методы исследования взаимодействия газовых пузырьков в жидкости вблизи их контакта в пульсирующем поле давления / Сандулян Ш. В. — Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского, 2019.
116. *Sanduleanu, S.* Interaction of two pulsating spherical bubbles in external pressure field near the contact / S. Sanduleanu, A. Petrov // *Journal of Physics: Conference Series*. Т. 656. — IOP Publishing. 2015. — С. 012035.
117. *Бойнович, Л. Б.* Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение / Л. Б. Бойнович, А. М. Емельяненко // *Успехи химии*. — 2008. — Т. 77, № 7. — С. 619—638.
118. *De Gennes, P.-G.* Wetting: statics and dynamics / P.-G. De Gennes // *Reviews of modern physics*. — 1985. — Vol. 57, no. 3. — P. 827.
119. Смачивание: статика и динамика / П. де Жен [и др.] // *Успехи физических наук*. — 1987. — Т. 151, № 4. — С. 619—681.
120. Liquid–polymer triboelectricity: chemical mechanisms in the contact electrification process / M. D. Sosa, M. L. M. Ricci, L. L. Missoni, D. H. Murgida, A. Cánneva, N. B. D’Accorso, R. M. Negri // *Soft Matter*. — 2020. — Vol. 16, no. 30. — P. 7040—7051.

121. Visualization of charge dynamics when water droplets bounce on a hydrophobic surface / X. Li, L. Zhang, Y. Feng, Y. Zhang, H. Xu, F. Zhou, D. Wang // *ACS nano*. — 2023.
122. *Блехман, И.* Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника / И. Блехман. — Санкт-Петербург : Издательский дом "Руда и металлы", 2013. — С. 640.
123. A new approach to nucleation of cavitation bubbles at chemically modified surfaces / V. Belova [et al.] // *Physical Chemistry Chemical Physics*. — 2011. — Vol. 13, no. 17. — P. 8015—8023.
124. Experimental study of cavitation erosion of quartz in the presence of surfactant molecules / O. Fattalov, T. Lyubimova, K. Rybkin, I. Lunegov, M. Kuchinskiy // *Journal of Physics: Conference Series*. Vol.1809. — IOP Publishing. 2021. — P. 012019.
125. Исследование смачиваемости и адсорбции на примере моделирования методом молекулярной динамики / <https://studfile.net/preview/14788387/page:23/>. — 2025. — (Дата обр. 15.06.2025).
126. *Leighton, T. G.* An experimental study of the sound emitted from gas bubbles in a liquid / T. G. Leighton, A. J. Walton // *European Journal of Physics*. — 1987. — Vol. 8, no. 2. — P. 98.
127. *Bhangu, S. K.* Theory of sonochemistry / S. K. Bhangu, M. Ashokkumar // *Sonochemistry: From Basic Principles to Innovative Applications*. — 2017. — P. 1—28. — URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-54271-3_1.
128. *Лифшиц, Е. М.* Теория молекулярных сил притяжения между твердыми телами / Е. М. Лифшиц // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 1955. — Т. 29, № 3. — С. 94—110.
129. Surface interaction mechanisms in mineral flotation: Fundamentals, measurements, and perspectives / L. Xie, J. Wang, Q. Lu, W. Hu, D. Yang, C. Qiao, X. Peng, Q. Peng, T. Wang, W. Sun, [et al.] // *Advances in Colloid and Interface Science*. — 2021. — Vol. 295. — P. 102491.

130. *Malysa, K.* Influence of surface active substances on bubble motion and collision with various interfaces / K. Malysa, M. Krasowska, M. Krzan // *Advances in colloid and interface science.* — 2005. — Vol. 114. — P. 205—225.
131. Surfactant sorption on a single air bubble in an ultrasonic standing acoustic wave field / A. Keshmiri, S. Heitkam, A. Bashkatov, M. Eftekhari, K. Eckert, B. Keshavarzi // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* — 2023. — Vol. 665. — P. 131210.
132. Effect of ultrasonic standing waves on flotation bubbles / L. Jin, W. Wang, Y. Tu, K. Zhang, Z. Lv // *Ultrasonics Sonochemistry.* — 2021. — Vol. 73. — P. 105459.
133. *Extrand, C. W.* Contact angles and hysteresis on surfaces with chemically heterogeneous islands / C. W. Extrand // *Langmuir.* — 2003. — Vol. 19, no. 9. — P. 3793—3796.
134. Physics of contact angle measurement / E. Decker, B. Frank, Y. Suo, S. Garoff // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* — 1999. — Vol. 156, no. 1—3. — P. 177—189.
135. Energetic study of ultrasonic wettability enhancement / J. A. Sarasua, L. R. Rubio, E. Aranzabe, J. L. V. Vilela // *Ultrasonics Sonochemistry.* — 2021. — Vol. 79. — P. 105768.
136. *Trapuzzano, M. A.* Controlled Wetting Using Ultrasonic Vibration : PhD thesis / Trapuzzano Matthew A. — University of South Florida, 2019. — URL: <https://www.proquest.com/openview/3ad307bf0f8bae402a8603a2f6425529/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>.
137. Volume and Frequency-Independent Spreading of Droplets Driven by Ultrasonic Surface Vibration / M. Trapuzzano, A. Tejada-Martínez, R. Guldiken, N. Crane // *Fluids.* — 2020. — Vol. 5, no. 1. — P. 18.

138. Ultrasound-driven titanium modification with formation of titania based nanofoam surfaces / Y. Zhukova, S. A. Ulasevich, J. W. Dunlop, P. Fratzl, H. Möhwald, E. V. Skorb // *Ultrasonics sonochemistry*. — 2017. — Vol. 36. — P. 146—154.
139. *Shklyayev, S.* Linear oscillations of a compressible hemispherical bubble on a solid substrate / S. Shklyayev, A. Straube // *Physics of Fluids*. — 2008. — Vol. 20, no. 5. — P. 052102.
140. *Lyubimov, D. V.* Resonance oscillations of a drop (bubble) in a vibrating fluid / D. V. Lyubimov, T. P. Lyubimova, A. A. Cherepanov // *Journal of Fluid Mechanics*. — 2021. — Vol. 909. — A18.
141. *Miller, C. A.* The oscillations of a fluid droplet immersed in another fluid / C. A. Miller, L. E. Scriven // *Journal of Fluid Mechanics*. — 1968. — Vol. 32, no. 3. — P. 417—435.
142. Нелинейные несферические колебания пузырька газа при периодическом изменении давления окружающей жидкости / А. А. Аганин, М. А. Ильгамов, Л. А. Косолапова, В. Г. Малахов // *Теплофизика и аэромеханика*. — 2008. — Т. 15, № 3. — С. 521—533.
143. *Gilmore, F. R.* The growth or collapse of a spherical bubble in a viscous compressible liquid. Vol. 26 / F. R. Gilmore. — California Institute of Technology Pasadena, CA, 1952.
144. *Rayleigh, L.* On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity: *Philosophical Magazine Series 6*, 34, 94—98 / L. Rayleigh. — 1917.
145. *Leighton, T.* The acoustic bubble / T. Leighton. — California : Academic press, 2012. — URL: <https://books.google.ru/books?id=tR-8SNimBuEC>.
146. *Blekhman, L.* Engineering model of the vibrational transportation process / L. Blekhman, I. Blekhman, V. Vasilkov // *Vibroengineering PROCEDIA*. —

2020. — ИЮНЬ. — Т. 32. — С. 26—31. — URL: <https://doi.org/10.21595/vp.2020.21519>.
147. *Gogate, P. R.* Some aspects of the design of sonochemical reactors / P. R. Gogate, A. M. Wilhelm, A. B. Pandit // *Ultrasonics Sonochemistry*. — 2003. — Vol. 10, no. 6. — P. 325—330. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417703001032>.
 148. Janus membranes with asymmetric wettability for fine bubble aeration / H.-C. Yang, J. Hou, L.-S. Wan, V. Chen, Z.-K. Xu // *Advanced Materials Interfaces*. — 2016. — Vol. 3, no. 9. — P. 1500774.
 149. *Xiong, Y.* Optimization of cavitation venturi tube design for pico and nano bubbles generation / Y. Xiong, F. Peng // *International journal of mining science and technology*. — 2015. — Vol. 25, no. 4. — P. 523—529.
 150. *Makuta, T.* Generation of microbubbles from hollow cylindrical ultrasonic horn / T. Makuta, R. Suzuki, T. Nakao // *Ultrasonics*. — 2013. — Vol. 53, no. 1. — P. 196—202.
 151. Generation of nanobubbles by ceramic membrane filters: The dependence of bubble size and zeta potential on surface coating, pore size and injected gas pressure / A. K. A. Ahmed, C. Sun, L. Hua, Z. Zhang, Y. Zhang, W. Zhang, T. Marhaba // *Chemosphere*. — 2018. — Vol. 203. — P. 327—335. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653518305800>.
 152. *Bai, H.* Bubble formation during horizontal gas injection into downward-flowing liquid / H. Bai, B. G. Thomas // *Metallurgical and materials transactions B*. — 2001. — Vol. 32, no. 6. — P. 1143—1159.
 153. Performance of porous-venturi microbubble generator for aeration process / L. P. Afisna, W. E. Juwana, I. Indarto, D. Deendarlianto, F. M. Nugroho // *JEMMME (Journal of Energy, Mechanical, Material, and Manufacturing Engineering)*. — 2017. — Vol. 2, no. 2. — P. 73—80.

154. Size distribution and Sauter mean diameter of micro bubbles for a Venturi type bubble generator / A. Gordiychuk, M. Svanera, S. Benini, P. Poesio // *Experimental Thermal and Fluid Science*. — 2016. — Vol. 70. — P. 51—60. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0894177715002149>.
155. *Brotchie, A.* Effect of power and frequency on bubble-size distributions in acoustic cavitation / A. Brotchie, F. Grieser, M. Ashokkumar // *Physical review letters*. — 2009. — Vol. 102, no. 8. — P. 084302.
156. *Радж, Б.* Применения ультразвука / Б. Радж, В. Раджендран, П. Паланичачи ; пер. А. Ширшова. — Москва : Техносфера, 2006. — С. 575. — (Мир физики и техники). — URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_002984059/ (дата обр. 07.09.2025).
157. A review on bubble generation and transportation in Venturi-type bubble generators / J. Huang, L. Sun, H. Liu, Z. Mo, J. Tang, G. Xie, M. Du // *Experimental and Computational Multiphase Flow*. — 2020. — Vol. 2, no. 3. — P. 123—134.
158. Bulk nanobubbles, generation methods and potential applications / E. P. Favvas, G. Z. Kyzas, E. K. Efthimiadou, A. C. Mitropoulos // *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. — 2021. — Vol. 54. — P. 101455. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135902942100039X>.
159. *Bournival, G.* Examination of NaCl and MIBC as bubble coalescence inhibitor in relation to froth flotation / G. Bournival, R. Pugh, S. Ata // *Minerals Engineering*. — 2012. — Vol. 25, no. 1. — P. 47—53.
160. Toward efficient interactions of bubbles and coal particles induced by stable cavitation bubbles under 600 kHz ultrasonic standing waves / Y. Chen, C. Ni, G. Xie, Q. Liu // *Ultrasonics sonochemistry*. — 2020. — Vol. 64. — P. 105003.
161. *Tang, S.-P.* Collision dynamics of SDS solution drops on a smooth wood substrate: Role of surface tension / S.-P. Tang, S. Hussain, S.-Y. Lin // *Journal of Molecular Liquids*. — 2020. — Vol. 320. — P. 114480.

162. Experimental study of the processes of formation, drift and levitation of vapor–gas bubbles in water containing surfactant under the action of ultrasound / O. Fattalov, T. Lyubimova, K. Rybkin, M. Kuchinskiy // *Microgravity Science and Technology*. — 2021. — Vol. 33, no. 2. — P. 1–7.
163. *Firouzi, M.* A quantitative review of the transition salt concentration for inhibiting bubble coalescence / M. Firouzi, T. Howes, A. V. Nguyen // *Advances in colloid and interface science*. — 2015. — Vol. 222. — P. 305–318. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001868614002292>.
164. Flotation of fine particles in the presence of combined microbubbles and conventional bubbles / S. Farrokhpay, I. Filippova, L. Filippov, A. Picarra, N. Rulyov, D. Fornasiero // *Minerals Engineering*. — 2020. — Vol. 155. — P. 106439. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687520302594>.