

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОВЕДЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИПМаш РАН)**



В.О., Большой пр-т, д. 61, Санкт-Петербург, 199178
Тел.: +7 (812) 321-47-78, факс: +7 (812) 321-47-71;

<https://ipme.ru>, e-mail: ipmash@ipme.ru

ОКПО 04850273 ОГРН 1037800003560 ИНН 7801037069 КПП 780101001



УТВЕРЖДАЮ

Директор, д.т.н.

В.А. Полянский

«15» января 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Кучинского Михаила Олеговича

«Экспериментальное исследование динамики пузырьков в жидкости при
ультразвуковом воздействии», представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

1. Актуальность темы диссертации

Ультразвуковое воздействие на жидкие среды активно исследуется и успешно используется в различных областях в течение многих лет. Вместе с тем динамика пузырьков в многокомпонентных жидких средах, которой посвящена диссертационная работа М.О. Кучинского, остается недостаточно изученной. Это ограничивает возможности более широкого использования ультразвука в технологических процессах. В частности, несмотря на значительное число публикаций, ультразвуковые воздействия в настоящее время практически не применяются в такой перспективной для новаций области с огромными объемами переработки сырья, как обогащение полезных ископаемых, где основным процессом является флотация. Все изучаемые в диссертации эффекты рассматриваются под углом их возможного использования при флотации и в других технологиях. Поэтому тема диссертационной работы М.О. Кучинского, несомненно, актуальна.

2. Структура и содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы из 164 наименований. Общий объем работы составляет 126 страниц, включая 46 рисунков и 1 таблицу.

Во **введении** рассматриваются основные аспекты исследуемой темы диссертации, обосновываются актуальность, цели и задачи работы, научная новизна и значимость, формулируются основные положения, выносимые на защиту. Указаны публикации, личный вклад автора, соответствие диссертации требованиям научной специальности и представлена структура работы.

Первая глава посвящена методам исследования акустических полей и регистрации кавитационных событий. Приведен обзор современных исследований, включающий сравнительный анализ экспериментальных методик. Представлена конструкция экспериментальной установки и приведены результаты исследования кавитационной активности в сонохимическом реакторе при ультразвуковом воздействии.

Описывается разработанный в рамках диссертационной работы метод визуализации пространственного распределения кавитационных событий с использованием тепловых карт, позволяющий отслеживать их временную динамику. Для регистрации кавитационной активности использовалась тонкая алюминиевая фольга, натянутая на вертикальную рамку. Области разрушения фиксировались цифровой камерой; анализ данных выполнялся с помощью написанной программы обработки изображений. Разработанный метод позволил проанализировать пространственно-временное распределение кавитационной активности в дистиллированной воде, исследовать влияние добавок соли NaCl и ПАВ SDS на процессы кавитации, включая скорость образования и расположение кавитационных зон. Выявлена корреляция между зонами кавитационной активности и областями с повышенными значениями акустического давления в сонохимическом реакторе. Это позволило сделать вывод о том, что разработанный метод может служить эффективным инструментом визуализации, мониторинга и оптимизации рабочих параметров ультразвуковых полей в установках, используемых для обогащения руд, очистки поверхностей и в сонохимических процессах. Представленные в данной главе результаты свидетельствуют о том, что в растворах соли NaCl и ПАВ SDS наблюдается снижение активности кавитационных событий, что может повлиять на использование ультразвука в процессе флотации, изменяя процессы образования и стабильности пузырьков, их взаимодействие с частицами руды и, как следствие, эффективность разделения минералов.

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

При экспериментах использовалась модернизированная установка, описанная в первой главе. Для изучения процессов взаимодействия под действием ультразвука применялась оптическая система, позволяющая регистрировать прикрепление пузырьков к твердой поверхности, их колебания, отрыв от поверхности, а также изменение контактного угла. Особое внимание уделено анализу изменения контактного угла под действием ультразвука.

Эксперименты показали принципиальные различия в поведении пузырьков на поверхностях с разной смачиваемостью. В случае гидрофильной кварцевой поверхности под действием ультразвука пузырек смещается в зону пониженного акустического давления, где совершает трансляционные колебания, сопровождающиеся изменением формы, при этом он не закрепляется на поверхности из-за сохранения тонкой жидкой прослойки между пузырьком и пластиной. На относительно гидрофобных (акрил и тефлон), в отличие от гидрофильных поверхностей наблюдается устойчивое закрепление. После смещения в область низкого акустического давления пузырек закрепляется на поверхности, демонстрируя в дальнейшем лишь колебания формы с частотой, соответствующей частоте второй моды собственных колебаний формы сферического пузырька.

Исследовано изменение контактного угла при ультразвуковом воздействии как в статических, так и в динамических условиях. Результаты данной главы показывают, что ультразвуковое воздействие вызывает гидрофобизацию поверхности, что свидетельствует о перспективах повышения эффективности флотационного процесса.

Третья глава посвящена исследованию влияния ультразвукового воздействия на характеристики воздушных пузырьков, генерируемых в воде и водных растворах NaCl и ПАВ (SDS) с использованием кварцевой ультрафильтрационной мембраны с диаметром пор 0.9 – 1.4 мкм в присутствии потока жидкости, направленного под углом 45° к поверхности мембраны. Представлена конструкция экспериментальной установки. Добавление солей NaCl и ПАВ SDS в отсутствие ультразвукового воздействия приводит к увеличению количества пузырьков при одновременном уменьшении их среднего размера. При ультразвуковом воздействии наблюдается обратный эффект: снижение количества пузырьков при увеличении их среднего размера, что связано с интенсификацией процессов коалесценции. Особый практический интерес представляет обнаруженный в случае комбинированного раствора соли NaCl (0.3 моль/л) и ПАВ SDS (3 ммоль/л) эффект компенсации взаимного влияния NaCl и SDS на распределение пузырьков по размерам. В этом случае сохраняется распределение пузырьков по размеру, характерное для чистой воды, при десятикратном увеличении их количества в объеме.

Наблюдаемые эффекты позволяют с помощью ультразвука достигать оптимального размера и количества пузырьков. Это показывает потенциальную возможность использования ультразвука для повышения эффективности процесса флотации в особенности при переработке труднообогатимых тонковкрапленных руд.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

3. Научная новизна проведенных исследований и полученных результатов

Научная новизна работы определяется полученными результатами.

Разработан новый метод регистрации кавитационной активности, обеспечивающий пространственно-временной анализ активности кавитационных процессов в объеме сонохимического реактора.

Обнаружена корреляция между полями кавитационной активности и акустического давления, позволяющая использовать данные о распределении активности кавитации для нахождения распределения звукового давления.

Найдено, что увеличение концентрации NaCl в воде приводит к подавлению кавитационной активности за счет повышения поверхностного натяжения и вязкости раствора, что затрудняет образование и рост кавитационных пузырьков.

Обнаружено, что под действием ультразвука поверхность пузырька, закрепившегося на гидрофобной твердой поверхности, совершает колебания с частотой, близкой к частоте второй моды собственных колебаний формы сферического пузырька.

Показано, что в результате воздействия ультразвука статический контактный угол уменьшается за счет изменения свойств поверхности, а после прекращения обработки остается неизменным в течение длительного времени.

Показано, что ультразвуковая обработка водных растворов NaCl приводит к увеличению среднего размера пузырьков, генерируемых мембранным методом, по сравнению с чистой водой.

Зафиксирован и количественно охарактеризован эффект совместного влияния добавления NaCl и SDS в ультразвуковом поле, проявляющийся в сохранении распределения пузырьков по размеру, характерного для чистой воды, при десятикратном увеличении количества генерируемых пузырьков.

4. Оценка практической значимости результатов

Результаты, полученные в рамках диссертационной работы, углубляют понимание механизмов ультразвукового воздействия на жидкости с пузырьками, в том числе, при наличии реагентов. Метод, предложенный в первой главе диссертации, применим для анализа активности кавитационных процессов в светопроницаемых жидкостях. Результаты, изложенные во второй главе, могут быть использованы при анализе процессов закрепления пузырьков на твердых поверхностях и изменения смачиваемости поверхностей под действием ультразвука. Материалы третьей главы дают представление о закономерностях генерации пузырьков в водных растворах соли NaCl и ПАВ SDS. Установленные зависимости влияния ультразвука на параметры генерируемых газовых включений подтверждают возможность управления их размерами и концентрацией. Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы в различных технологических приложениях, включая процессы флотационного обогащения полезных ископаемых.

5. Обоснованность и достоверность результатов диссертации

Обоснованность и достоверность научных положений, результатов и выводов обеспечена физической обоснованностью постановки эксперимента, применением современной высокоточной измерительной аппаратуры, апробированных экспериментальных методик. Полученные результаты согласуются с литературными данными, теоретическими и экспериментальными результатами других исследователей.

6. Публикации и соответствие автореферата диссертационной работе

Диссертация соответствует специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы». Основное содержание диссертационной работы, ее главные результаты в полной мере отражены в 8 статьях, опубликованных в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, из них 7 в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

7. Замечания по тексту диссертации и автореферату.

1. В разделе 1.4 диссертации на стр. 35–36 приводятся результаты экспериментального исследования кавитации в дистиллированной воде. При этом говорится и показано на рис. 1.7, что по высоте слоя жидкости равного 160 мм размещаются 3 ультразвуковых волны, длины которых равны 53 мм. Такая длина волны при частоте 28 кГц получается при скорости звука около 1500 м/с в воде при отсутствии пузырьков. Известно, однако, что уже при объемной концентрации пузырьков 1 % скорость звука падает приблизительно до 100 м/с, что соответствует длине волны в 15 раз меньшей. При большей концентрации кавитирующих пузырьков скорость звука может снизиться до 20–25 м/с и длина волны уменьшится в 60–75 раз по сравнению с жидкостью без пузырьков. Сказанное относится также к разделу 1.6 (стр. 43–44 и рис. 1.13), где исследуется кавитация в водных растворах ПАВ. Экспериментальные результаты не вызывают сомнения, но их интерпретация, возможно, требует уточнения. (Заметим, что данные об объемной концентрации кавитационных пузырьков, вероятно, могут быть получены из материалов киносъемки).

2. В качестве нового научного результата в диссертационной работе отмечен эффект возникновения при ультразвуковом воздействии колебаний поверхности пузырька, закрепившегося на гидрофобной поверхности, с частотой, близкой к частоте второй моды собственных колебаний формы для сферического пузырька. Желательно было бы высказать соображения о механизме этого явления.

3. При экспериментальном определении статического краевого угла отдельно фиксировались и наносились на разные графики значения левого и правого краевых углов (рис. 2.8 и 2.9 диссертации и рис. 8 автореферата). По-видимому, правильнее было бы использовать зависимости от средних статических краевых углов, а на рисунках приводить оба значения для характеристики точности измерений.

4. В диссертации и автореферате многократно используется выражение «пузырьки флотационного размера», например, на стр. 4, 5, 7, 14 автореферата. Представляется, что это понятие требует расшифровки в конкретных случаях, поскольку при флотации оно подразумевает широкий диапазон размеров пузырьков и зависит от способа аэрации (типа флотомашин), определяется вкрапленностью ценного минерала, зависит от плотности пульпы, ее температуры, концентрации пенообразователя и т.д.

5. В качестве непринципиальных редакционных замечаний отметим различное написание размерности микрона и неточности в цифровых значениях на правой шкале рис. 3.8 диссертации и аналогичного рис. 10, а автореферата.

8. Заключение по диссертации

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации.

