

ОТЗЫВ

**официального оппонента к.ф.-м.н. Карпунина Ивана Эдуардовича
на диссертационную работу 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».**

Диссертационная работа Кучинского Михаила Олеговича посвящена экспериментальному исследованию поведения жидкостей с пузырьками и определению закономерностей процессов при ультразвуковом воздействии. В связи технологическими приложениями использование ультразвука в жидкостных системах представляется перспективным направлением. Понимание процессов и определение характерных закономерностей ультразвукового воздействия с учетом введения химических добавок крайне важно с позиции как фундаментальной науки, так и технологического применения. Соответствующие исследования представляют интерес поскольку с помощью ультразвука возможно достигать оптимального размера и количества пузырьков, контролировать их взаимодействие с поверхностью, а также управлять динамикой в целом, что крайне важно с позиции разработки методов повышения эффективности флотации. Всё вышесказанное несомненно определяет **актуальность** диссертационной работы.

Содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, трех содержательных глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 164 наименования. Общий объём диссертации составляет 126 страниц, включая 46 рисунков.

Во введении соискателем отражены актуальность и степень разработанности исследования, сформулированы цель и задачи исследования. Обоснована научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Представлены основные результаты, выносимые на защиту; приведена информация об апробации результатов диссертационного исследования и основных публикациях.

В первой главе основное внимание уделено определению влияния ультразвукового воздействия на жидкостные системы в сонохимическом реакторе. Проанализировано пространственно-временное распределение кавитационной активности в дистиллированной воде и исследовано влияние добавления соли NaCl и ПАВ SDS различной концентрации на кавитационные процессы, включая скорость образования и расположение кавитационных зон. Продемонстрировано, что разработанный и апробированный метод может служить эффективным инструментом визуализации и мониторинга ультразвуковых полей.

Во второй главе представлены результаты экспериментального исследования влияния ультразвука на взаимодействие воздушных пузырьков

с твердыми поверхностями с различной степенью смачиваемости – гидрофобными и гидрофильными. В случае как гидрофильных, так и гидрофобных поверхностей показано, что действие ультразвука приводит к перемещению пузырька вдоль пластины в область низкого давления и в последствии к колебаниям его формы. Обнаружено, что на коротких временных масштабах колебания параметров пузырька при ультразвуковом воздействии совершаются с частотой близкой к частоте второй моды собственных колебаний формы сферического пузырька. Подробно исследована динамика контактного угла закрепленного на поверхности пузырька в случае рассмотрения поверхностей с разной смачиваемостью при действии ультразвука. Обнаружен эффект необратимого уменьшения статического краевого угла после ультразвукового воздействия свидетельствующий о модификации поверхности.

В третьей главе исследовано влияние ультразвука на генерацию пузырьков флотационного размера в дистиллированной воде и водных растворах соли NaCl и ПАВ SDS. Установлено, что в зависимости от концентрации растворенного вещества наблюдается общая тенденция значительного возрастания общего количества генерируемых пузырьков по сравнению с дистиллированной водой. При совокупном процессе мембранной генерации пузырьков и ультразвуковом воздействии обнаружено, что для всех рассмотренных жидкостных систем характерно увеличение среднего размера пузырьков из-за процесса коалесценции, а также уменьшение их концентрации. Важным результатом является демонстрация обнаруженного эффекта многократного увеличения общего числа генерируемых пузырьков наряду с уменьшением их среднего диаметра в комбинированном водном растворе соли NaCl и ПАВ SDS по сравнению с чистой дистиллированной водой.

В заключении соискателем представлены ключевые результаты выполненного научного исследования и отражены перспективы для дальнейшей разработки темы в приложении к реальным технологическим и производственным процессам.

Научная новизна работы заключается в разработке метода пространственно-временной регистрации кавитационной активности в сонохимическом реакторе, позволившего выявить прямую корреляцию между полями кавитационной активности и акустического давления. Установлено, что повышение концентрации NaCl или ПАВ подавляет кавитационные процессы за счет изменения физико-химических свойств раствора. Диссертантом экспериментально исследованы особенности колебаний пузырьков на гидрофобных и гидрофильных поверхностях, а также обнаружен эффект длительного изменения смачиваемости поверхности под действием ультразвука. В работе выявлены закономерности влияния ультразвуковой обработки на мембранную генерацию пузырьков, приводящую к изменению размера и концентрации как в солевых растворах, так и в растворах ПАВ.

Особую значимость представляет обнаруженный комбинированный эффект NaCl и ПАВ SDS, позволяющий десятикратно увеличить концентрацию генерируемых пузырьков при сохранении их исходного размерного распределения. В совокупности результаты диссертационной работы раскрывают новые механизмы управления как параметрами газовых включений в жидких средах, так и их динамикой, посредством ультразвукового воздействия.

Теоретическая значимость исследования заключается в углублении фундаментальных представлений о механизмах ультразвукового воздействия на жидкие среды и выявлении физических закономерностей поведения пузырьков. Также стоит отметить разработанный и апробированный метод определения зон кавитационной активности. **Практическая значимость работы**, несомненно, состоит в конкретном прикладном потенциале для реальных технологических процессов, в особенности в области вопросов управления газовыми пузырьками и флотационного обогащения руд.

Степень достоверности результатов, представленных в работе, не вызывает вопросов, поскольку осуществлена качественная постановка и реализация экспериментов с использованием современного оборудования и апробированных методик. Результаты диссертации изложены в 8 работах, которые изданы в журналах рекомендованных для публикации основных результатов диссертационных исследований, из них 7 в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus. Диссертация Кучинского Михаила Олеговича прошла всю необходимую апробацию, а результаты исследований были представлены на профильных конференциях как всероссийского, так и международного масштабов.

К представленной к отзыву диссертационной работе могут быть высказаны следующие **замечания**:

1. В Главе 1 при описании эрозии фольги в сонохимическом реакторе при ультразвуковом воздействии (пункты 1.4-1.6) применяется термин «тепловая карта», вводящий поначалу в некоторое заблуждение. В процессе ознакомления с текстом работы становится понятным, что соискателем имеется в виду степень и скорость разрушения фольги, а не описание температурного распределения.

2. В подписи рисунка 1.10 и в описании к нему в тексте диссертации отсутствует уточняющая информация о представленных трехмерных тепловых картах активности кавитационных событий. Остается не до конца понятным является ли это некоторой временной динамикой или результатами, полученными при разных экспериментальных условиях.

3. Исходя из текста пункта 2.3.2 и подписей к рисункам 2.10 и 2.11 непонятно для пузырька какого размера представлены экспериментальные результаты. Далее в последнем абзаце пункта указано, что графики соответствуют пузырьку диаметром 1.61 мм. Однако, судя по рисунку 2.11 – это средняя по времени величина высоты пузырька h . Величина диаметра пузырька, для которого представлены экспериментальные результаты, остается до конца неясной.

4. В пункте 2.3.2 при рассмотрении динамики левого и правого контактных углов пузырька на акриловой поверхности четко прослеживается разница в характере их колебаний. При этом в пункте 2.3.3 при рассмотрении колебаний на тефлоновой поверхности левый и правый контактные углы изменяются со временем однотипно. С чем может быть связана разница в поведении пузырька и обусловлена ли она разницей в материалах поверхности?

5. В пунктах 2.3.2 и 2.3.3 на структурно однотипных графиках на рисунках 2.11 и 2.14 используется разная подпись осей.

6. Как известно, ультразвуковое воздействие на жидкость приводит к её нагреванию. В ряде экспериментов, особенно в Главе 1, воздействие оказывается достаточно длительное время. Поскольку температура главным образом сказывается на интенсивности кавитации проводились ли оценки возможного изменения температуры или прямые ее измерения?

7. В Главе 3 не указана длительность ультразвукового воздействия на систему и как быстро изменялись количество и размер пузырьков. Данная информация значительно бы усилила понимание процесса и представление результатов.

В целом высказанные замечания носят уточняющий характер и не являются критическими при формировании общей положительной оценки при ознакомлении с диссертационной работой Кучинского Михаила Олеговича.

В **автореферате** соискателем достаточно полно представлены все необходимые разделы и отражены основные результаты диссертационного исследования. Замечания к структуре и тексту автореферата отсутствуют.

В качестве **заключения** следует отметить, что диссертация Кучинского Михаила Олеговича выполнена на хорошем научном уровне и является законченной научно-квалификационной работой. Считаю, что диссертационная работа «Экспериментальное исследование динамики пузырьков в жидкости при ультразвуковом воздействии» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертационным работам, в том числе п.9 Положения "О порядке присуждения ученых степеней", а её

автор Кучинский Михаил Олегович **заслуживает** присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

Доцент кафедры физики и технологии
ФГБОУ ВО «Пермский государственный
гуманитарно-педагогический университет»,
кандидат физико-математических наук

Карпунин

Карпунин Иван Эдуардович
26.01.2026

Адрес: 614990, г. Пермь, ул. Сибирская, д. 24,
ПГГПУ, <https://pspu.ru/>
Телефон: +7 (342) 215-19-47
E-mail: karpunin_ie@pspu.ru

Я, Карпунин Иван Эдуардович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета Д 004.036.01, и их дальнейшую обработку.

Подпись Карпунина И.Э. удостоверяю

Ученый секретарь ФГБОУ ВО «ПГГПУ»

Гранкина

/ Гранкина Е.Н.

