



Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

«Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
Тел. (499) 263-63-91 Факс (499) 267-48-44
E-mail: bauman@bmstu.ru
ОГРН 1027739051779
ИНН 7701002520 КПП 770101001

27.11.2020 № 01.03-10/554

на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор - проректор по научной работе
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Московский государственный
технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ имени Н.Э. Баумана),

Доктор технических наук В.Н. Коробец



2020 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Макалкина Дмитрия Ильича

«Динамика межфазных границ, сепарирование и абляция в двухкомпонентных
конденсированных средах под действием ультразвука»,

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук,

по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Актуальность исследования. Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств материалов и экспериментальное исследование свойств жидкостей представляет собой актуальную проблему физики конденсированного состояния.

Настоящая диссертация направлена на экспериментальное исследование отклика двухкомпонентных конденсированных сред на ультразвуковое воздействие, исследование динамики межфазных границ, установление эффективных экспериментальных режимов сепарирования и абляции под действием ультразвука. Использование ультразвука в исследованиях двух- и многокомпонентных сред и

воздействия на них находят широкое применение, включая химические и биотехнологии, технологии фармацевтики, микро- и нанофлюидику (лаборатории на чипе, lab-on-a-chip), технологии мягкой материи. Тема настоящей диссертации соответствует мировым тенденциям исследований воздействия ультразвука на конденсированные среды.

Воздействие сфокусированного ультразвукового пучка на поверхность жидкости приводит к ее распылению и формированию эмульсий, что используется на практике в устройствах распыления жидкостей и коагуляции аэрозолей. Однако, случай, при котором ультразвук воздействует на границу раздела несмешивающихся жидкостей, изучен недостаточно полно. Применение ультразвука в новом классе микроустройств – «лаборатория-на-чипе» – позволяет совершать тонкие манипуляции над объектами исследований малых размеров: разделение, перемещение, смешивание и другие. Вот почему актуальной задачей является проведение исследования по воздействию ультразвука на границу раздела двух жидкостей, находящихся в малом объеме. До выполнения данной работы оставался недоказанным эффект сепарирования эритроцитов и плазмы крови в поле стоячей поверхностной акустической волны, имеющий практическое применение в «лаборатории-на-чипе». Поиск нового метода определения коэффициента межфазного натяжения бинарных жидкостей, для которых характерны малые значения этого коэффициента, является актуальной задачей, востребованной в целом ряде областей, от физики конденсированных сред до физической химии и наук о материалах, поскольку существующие методы определения поверхностного натяжения либо оказываются неподходящими для бинарных жидкостей, так как меняют их свойства, либо слишком грубыми, либо являются слишком сложными для проведения такого измерения в условиях невесомости, в которых точность измерения повышается. Существуют различные методы создания наночастиц, что обусловлено большим спросом на них в научных исследованиях и приложениях. Наряду с лазерной абляцией твердых тел в жидкости, как метода создания наночастиц, известен эффект дробления твердых тел, помещенных в жидкость, под действием интенсивного сфокусированного ультразвука на мелкие фрагменты. Явление это отличается сильной неравновесностью и

нелинейностью, а потому продолжение исследования ультразвуковой абляции твердых тел является актуальным.

Структура и содержание диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 111 страницах, содержит 40 рисунков. Список цитируемой литературы включает 75 источников.

Во Введении диссертации изложена актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, отмечены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, определены защищаемые положения, приведены доклады по теме диссертации.

Первая глава начинается литературным обзором работ в области ультразвукового воздействия на границы раздела жидкостей. Далее приведены результаты экспериментов, выполненных в данном исследовании. Их целью было исследование динамики границы раздела двух несмешивающихся маловязких жидкостей, находящихся в малом объеме, под действием сфокусированного ультразвукового пучка. Обнаружены три режима воздействия такого пучка на границу раздела, отличающиеся энергией ультразвука. В первом режиме (с наименьшей энергией) развиваются вынужденные колебания, наиболее эффективные при положении границы раздела, удаленной от ультразвукового преобразователя на расстояние, чуть меньшее полутора фокусных расстояний ультразвукового пучка. Во втором режиме, с большей энергией ультразвукового пучка, обнаружен новый эффект, заключающийся в управляемой эмиссии одиночных моноразмерных капель более плотной жидкости в менее плотную и выявлен линейный рост размера этих капель с увеличением длительности ультразвукового импульса. Показано, что диапазон длительности импульса, в котором реализуется режим эмиссии одиночных капель, можно изменять, варьируя расстояние между плоскостями фокусировки ультразвукового пучка и раздела жидкостей. В третьем режиме (с наибольшей энергией ультразвука) выявлена хаотическая множественная эмиссия капель.

Вторая глава начинается с обзора методов измерения межфазного натяжения для бинарных и несмешивающихся жидкостей. Далее описаны поставленные в данной

работе эксперименты по измерению коэффициента межфазного натяжения с помощью возбуждения капиллярных волн ультразвуковым импульсом, сфокусированным на границе раздела жидкостей. Предложенный и реализованный новый метод позволил измерить малые значения коэффициента межфазного натяжения ($\sim 10^{-3}$ Н/м), причем с достаточно высокой точностью ($\sim 10^{-4}$ Н/м), но только в условиях микрогравитации (достигаемых при движении самолета-лаборатории по параболической траектории). Метод работает как для несмешивающихся, так и для бинарных жидкостей.

Третья глава начинается с обзора литературы в области технологий «лаборатория-на-чипе»: среди разнообразных методов этой технологии известны ультразвуковые методы, используемые, в частности, в транспорте частиц коллоидного раствора и их группировке в поле стоячих поверхностных акустических волн. Далее описаны эксперименты, поставленные в данной работе, с целью изучения возможности сепарирования эритроцитов и плазмы крови с помощью стоячих поверхностных акустических волн. В результате этих экспериментов впервые осуществлено сепарирование эритроцитов и плазмы крови человека. Возможность такого сепарирования была неочевидна с точки зрения взаимодействия между стоячими поверхностными акустическими волнами мегагерцового диапазона и частицами коллоидного раствора.

Четвертая глава начинается с литературного обзора методы получения наночастиц твердых тел в жидкости посредством абляции этих тел. Одним из методов, позволяющих получить частицы микроразмеров, является ультразвуковой метод. Далее в этой главе описаны результаты проведенных в данной работе экспериментов по воздействию высокоинтенсивных ультразвуковых (мегагерцовых) импульсов на образец из гидрата сульфата кальция (гипс), находящийся в кювете, заполненной водой. В результате экспериментов получены частицы, подавляющее большинство которых обладают размерами в десятки нанометров, причем на эти наночастицы приходится около половины массы всех абляционных частиц.

В Заключении диссертации представлены основные результаты работы.

В Приложении приведена экспериментальная оценка интенсивности акустического поля в фокальной плоскости ультразвукового преобразователя на границе раздела жидкостей.

Личный вклад автора состоит в участии в формулировке цели и задач диссертации, в проведении исследований и их интерпретации. Все основные результаты получены автором лично или при непосредственном участии.

Научная новизна диссертационной работы связана с новыми экспериментально-установленными закономерностями динамики межфазных границ, эффектов сепарирования и абляции в двухкомпонентных конденсированных средах при ультразвуковом воздействии и в усовершенствованном новом методе исследования конденсированных сред. Впервые экспериментально установлены основные отличительные особенности ультразвукового возбуждения низшей симметричной моды колебаний и эмиссии капель на границе несмешивающихся маловязких жидкостей, находящихся в малом объеме, а также выделены три характерных режима реакции границы раздела на ультразвуковое воздействие. Предложен новый импульсный ультразвуковой метод измерения малых значений коэффициента межфазного натяжения несмешиваемых и бинарных жидкостей в условиях микрогравитации, характеризующийся значительной точностью (не хуже 5%) и скоростью измерения. Экспериментально проверена возможность сепарирования эритроцитов и плазмы крови человека в поле стоячих поверхностных акустических волн. Найдены новые экспериментальные режимы образования наночастиц при абляции образца гидрат сульфата кальция в воде под действием сфокусированных ультразвуковых импульсов.

Обоснованность и достоверность полученных результатов определяется использованием проверенных расчетных методов, воспроизводимостью получаемых данных, а также их согласием с известными результатами других авторов. Полученные результаты были опубликованы в рецензируемых научных журналах, а также представлялись на российских и международных конференциях.

Фундаментальная значимость. Результаты диссертации вносят вклад в развитие экспериментальных методов исследования границ раздела (интерфейсов) жидкость-жидкость и жидкость-твердое тело и потому обладают фундаментальной значимостью

для физики конденсированного состояния, химической физики и физической химии, материаловедения и физики мягкой материи. В особенности интересным представляется исследование поведения границы раздела двух несмешивающихся маловязких жидкостей, находящихся в малом объеме, при воздействии импульсного сфокусированного ультразвукового пучка, что позволило обнаружить три отличительных режима реакции границы (вынужденные колебания, управляемая и стохастическая эмиссия), которые можно использовать для анализа свойств жидкостей.

Прикладная значимость диссертации связана с перспективностью для практических приложений найденных соискателем новых закономерностей и методов, как эффект управляемой эмиссии капель заданного размера, импульсный ультразвуковой метод определения малых значений коэффициента межфазного натяжения несмешиваемых жидкостей, а также способ получения наночастиц путем ультразвуковой абляции. Результаты диссертации могут быть использованы в научных исследованиях по физике жидкостей, микрофлюидных технологиях, химической физике и физической химии, физики мягкой материи, выполняемых в МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГУ им. М.В. Ломоносова, ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, ИФВД им. Л.Ф. Верещагина РАН, МИРЭА, ИТМО и СПбГУ.

Автореферат диссертации в полной мере и правильно передает содержание работы. По основным результатам диссертации в журналах и сборниках конференций опубликовано 11 работ, из которых 5 статей опубликованы в российских и международных рецензируемых журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, РИНЦ и входящих в список ВАК.

Тема, содержание и результаты диссертации Макалкина Д.И. отвечают паспорту специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

По диссертации возникли вопросы и замечания:

1. В диссертации не приводятся объяснений, чем обусловлен выбор жидкостей, используемых в экспериментах по исследованию динамики границы несмешивающихся маловязких жидкостей, описанных в первой главе диссертации,

и в экспериментах по измерению малых значений коэффициента межфазного натяжения из второй главы?

2. В первой главе диссертации не сообщается о том, от каких именно свойств жидкостей зависит порог ультразвукового возбуждения низшей симметричной моды колебаний границы раздела?

3. Во второй главе диссертации на Рис. 2.3.1. графически последовательно соединены прямыми линиями экспериментально найденные точки, что некорректно, т.к. не учитывает разброса данных.

4. В третьей главе на Рис. 3.3.4. не приведен масштаб снимков.

5. В работе присутствуют опечатки, использована чрезмерно громоздкая нумерация рисунков.

Заключение

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и ее результатов.

Диссертация Д.И. Макалкина представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная для физики конденсированного состояния задача разработки новых экспериментальных методик и поиска эффективных режимов управления динамикой межфазных границ раздела жидкостей, сепарации и абляции материалов во внешних ультразвуковых полях.

Диссертационная работа Дмитрия Ильича Макалкина «Динамика межфазных границ, сепарирование и абляция в двухкомпонентных конденсированных средах под действием ультразвука» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней» в редакции постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, в части, касающейся диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

Заключение принято на заседании кафедры "Физика" федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)".

На заседании присутствовало 72 человека: из них 8 докторов наук, 51 кандидат наук. Результаты голосования: "за" – 72 чел., "против" – нет, "воздержались" – нет, протокол № 3 от 18.11.2020 г.

Доктор физико-математических наук,

Профессор кафедры ФН-4

МГТУ им. Н.Э. Баумана

105005, Москва, 2-я Бауманская ул.,

д. 5, стр. 1.

Телефон: +7(499) 263-63-91,

e-mail: st.yurchenko@mail.ru

Станислав Олегович Юрченко

Доктор физико-математических наук,

Профессор, чл.-корр. РАН,

заведующий кафедрой

ФН-4 МГТУ им. Н.Э. Баумана

105005, Москва, 2-я Бауманская ул.,

д. 5, стр. 1.

Телефон: +7(499) 263-63-91,

e-mail: amor59@mail.ru

Андрей Николаевич Морозов

« ВЕРНО »

НАЧАЛЬНИК
УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ

МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА



А. БАРЫШНИКОВ