

ОТЗЫВ

официального оппонента, д.ф.-м.н. Карабутова Александра Алексеевича
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

Кандидатская диссертация Д.И. Макалкина посвящена экспериментальному исследованию ряда актуальных задач ультразвукового воздействия на двухкомпонентные конденсированные среды. Большое внимание при этом уделяется особенностям стимулированной ультразвуком динамики границы несмешиваемых жидкостей, а также изучению эффектов сепарирования и абляции в двухкомпонентных средах, обусловленных действием ультразвука.

Актуальность темы диссертации обусловлена тем, что ультразвук является одним из важных и универсальных инструментов при изучении конденсированных сред: он может не только использоваться как средство диагностики различных параметров конденсированной среды, но может также выступать и в активной роли, оказывая силовое воздействие на конденсированную среду. Показательным примером может служить интенсивное использование ультразвука в медицине: и для целей диагностики, и, например, для разрушения представляющих опасность конкрементов в организме человека.

Кроме того, ультразвук становится все более востребованным в развитии инновационных технологий, таких как "лаборатория-на-чипе" ("lab-on-a-chip"). Это миниатюрные устройства, предназначенные для автоматизированного выполнения ряда последовательных манипуляций с исходными веществами, во многих случаях представленных жидкостями. Действия с ними могут включать такие операции, как разделение, прецизионное дозирование, концентрирование, смешивание промежуточных продуктов, доставку их в различные точки чипа и т.п. С этой точки зрения изучение различных аспектов воздействия сфокусированного ультразвукового пучка на границу раздела маловязких жидкостей, находящихся в небольшом объеме, проведенное в диссертации, представляется необходимым и актуальным. Если иметь в виду также необходимость перемещать различные малоразмерные объекты, в том числе, клетки, между различными по своему функционалу частями чипа, реализация эффекта разделения

эритроцитов и плазмы крови в поле стоячей поверхностной акустической волны также представляет значительный интерес).

Следует отметить, что при изучении эффектов воздействия ультразвука на границы конденсированных сред соискатель не ограничился только случаем границы между двумя жидкостями. В диссертации получен актуальный результат, относящийся и к случаю воздействия ультразвука на границу жидкость - твердое тело. А именно, обнаружено образование частиц с размерами в несколько десятков нанометров при ультразвуковой абляции твердотельного образца.

Далее, в настоящее время интенсивно изучаются свойства бинарных жидкостей, которые применяются в различных областях науки и технологий. Они, в частности, характеризуются весьма малыми значениями коэффициента межфазного натяжения. Существующие методы его измерения или не применимы вовсе, т.к. изменяют взаимную растворимость этих жидкостей, или требуют весьма громоздкого оборудования и сложной процедуры измерений. По этим причинам запрос на разработку методов для измерения малых значений коэффициента межфазного натяжения, которые могли бы обеспечить повышенную точность в том числе и для бинарных жидкостей, является актуальным. Отвечая на этот вызов, в диссертации предложен и экспериментально верифицирован ультразвуковой метод быстрого получения экспериментальных данных, позволяющих определять малые значения коэффициента межфазного натяжения с высокой точностью. Показано, что последняя для предложенного метода достигается только в условиях невесомости.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы. В начале каждой из четырех глав представлен литературный обзор по теме этой главы.

Во Введении обоснована актуальность темы работы, определены цель и задачи исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы защищаемые положения.

В первой главе рассмотрено воздействие сфокусированного ультразвукового пучка на границу раздела двух несмешивающихся маловязких жидкостей, находящихся в малом объеме. По мере нарастания энергии такого воздействия выделяются три характерных по своим проявлениям режима. В первом режиме с низкой энергией ультразвука возбуждаются только вынужденные его воздействием колебания интерфейса. Показано, что наибольшая амплитуда колебаний низшей симметричной моды достигается при положении границы

раздела на расстоянии от ультразвукового преобразователя, равном 1.3-1.5 фокусным расстояниям ультразвукового пучка. При возрастании энергии ультразвукового пучка, реализуется второй режим, который характеризуется эмиссией одиночных моноразмерных капель более плотной жидкости в менее плотную. Установлено, что размер капель увеличивается с длительностью ультразвукового импульса, а границами диапазона длительности, при котором наблюдается такая эмиссия, можно управлять, изменяя расстояние между плоскостями фокусировки ультразвукового пучка и раздела жидкостей. В третьем режиме (с наибольшей энергией) происходит хаотичная эмиссия множественных капель разных размеров.

Во второй главе описан новый метод измерения малых значений коэффициента межфазного натяжения (КМФН), отличающийся от известных повышенной точностью, оперативностью и простотой измерений. В основе метода лежит широкополосное возбуждение капиллярно-гравитационных волн коротким импульсом ультразвукового пучка, сфокусированного на границу раздела жидкостей. Апробация метода произведена с несмешивающимися и бинарными жидкостями как в лабораторных (при нормальной гравитации) условиях, так и в условиях микрогравитации, реализующихся на борту специального самолета-лаборатории, при его полетах по параболической траектории. Показано, что только в условиях микрогравитации предложенный метод позволяет определять малые ($\sim 10^{-3}$ Н/м) значения КМФН с достаточно малой, не превышающей 5% относительной погрешностью. Важно отметить, что адекватность результатов, полученных этим методом, подтверждена их совпадением с расчетами значений КМФН по альтернативным данным, независимо полученным при квазимонохроматическом ультразвуковом возбуждении границы жидкостей.

В третьей главе представлено описание впервые экспериментально реализованного эффекта сепарирования эритроцитов и плазмы крови человека в поле стоячих поверхностных акустических волн. Отмечается, что важность этого результата, в частности, обусловлена тем, что его получение, в рамках имеющейся теории воздействия стоячих поверхностных акустических ВЧ волн на частицы коллоидного раствора, априори не было очевидным.

В четвертой главе показано, что сфокусированные ультразвуковые импульсы с несущей частотой 1.8 МГц и пиковым перепадом амплитуды акустического давления в фокусе 50 МПа оказывают на модельные объекты из гипсовой смеси деструктивное воздействие, которое носит абляционный характер и приводит к образованию в числе прочих значительного числа

абляционных частиц с размерами, лежащими в интервале от 20 нм до 60 нм с максимумом распределения при 35 нм.

В Заключении представлены основные результаты и выводы диссертационной работы.

В Приложении диссертации описаны результаты экспериментальной оценки интенсивности акустического поля в фокальной плоскости ультразвукового преобразователя на границе раздела жидкостей.

В качестве наиболее значимых, на мой взгляд, результатов диссертационной работы Д.И. Макалкина можно отметить следующие:

1. Определение условий, при которых реализуется режим прецизионной ультразвуковой "пипетки", т.е. ультразвуковой эмиссии одиночных капель одинакового размера. При этом важно, что размером капель можно управлять, варьируя длительность ультразвукового импульса и расстояние от границы раздела до фокальной плоскости ультразвукового пучка.
2. Разработка ультразвукового метода, позволяющего быстро, за время порядка 3 секунд, получить в условиях микрогравитации полный набор экспериментальных данных, необходимых для определения с высокой точностью малых ($\sim 10^{-3}$ Н/м) значений коэффициента межфазного натяжения как для случая несмешиваемых, так и для более трудного случая бинарных жидкостей.
3. Экспериментальная реализация эффекта сепарирования эритроцитов и плазмы крови человека в поле стоячих поверхностных акустических волн, априори неочевидная в рамках существующих теоретических представлений.
4. Получение наночастиц методом ультразвуковой абляции.

Вместе с тем, к работе имеется и ряд замечаний....

1. Автор не приводит объяснений, чем обусловлен выбор жидкостей (перфлуортрипентиламин, перфторгексан, октаметилтрисилоксан, декаметилтетрасилоксан), использованных в проведении экспериментов по ультразвуковому воздействию на границу раздела жидкостей в первой главе и использованных в апробации метода измерения коэффициента межфазного натяжения в условиях микрогравитации, описанного во второй главе?

2. Во второй главе диссертации не приведено значение термина «микрогравитация». На стр.59 написано значение остаточной гравитации 0.05g при проведении экспериментов на

борту самолета, совершающего полет по параболической траектории, хотя и в названии главы и в условиях проведения экспериментов написано про микрогравитацию. Кроме того, в диссертации отсутствует проверка значения гравитации, существующей в кабине самолета. На рис. 2.3.1a (стр. 62) присутствует пометка « $g=0$ » в графике, построенном по результатам экспериментов в условиях микрогравитации, что совершенно недостижимо при таких полетах, и, вообще говоря, является некорректным выражением, поскольку значение ускорения свободного падения g даже на высотах полета самолета близко к 9.8 м/с^2 , и в данном случае правильнее было бы писать о значении веса на единицу массы, выражающегося в единицах g .

3. В диссертации присутствуют опечатки, есть стилистические ошибки.

4. Объем литературных обзоров мог бы быть больше. Идеология устройств «лаборатории-на-чипе» является в данный момент очень распространенной в среде научных заведений и корпораций, поскольку оказывается междисциплинарной, собирая вокруг себя многих специалистов, и потенциально очень востребованной в медицине. Наночастицы, как и методы их получения, являются уже не новой темой и потому эта область знаний представлена гигантским литературным наследием.

Диссертационная работа Д.И. Макалкина «Динамика межфазных границ, сепарирование и абляция в двухкомпонентных конденсированных средах под действием ультразвука» представляет собой законченное научное исследование, новизна и научная значимость которого не вызывают сомнений, так же как достоверность и обоснованность результатов, представленных в диссертации. Работа выполнена на высоком уровне постановки задач, выполнения экспериментов, математической обработки экспериментальных данных, интерпретации и представления результатов. Ряд результатов диссертации могут найти применение при разработке и развитии концепции «лаборатория на чипе».

Основные результаты диссертационной работы представлены в 11 печатных работах, опубликованных в специализированных научных журналах и сборниках конференций. Пять статей опубликованы в российских и международных рецензируемых журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, РИНЦ и входящих в список ВАК.

Автореферат диссертации Д.И. Макалкина достаточно полно отражает ее содержание и результаты.

Таким образом, можно заключить, что диссертационная работа Д.И. Макалкина соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

д.ф.-м.н., профессор Международного
учебно-научного лазерного центра МГУ
имени М.В.Ломоносова

Карбутов
29.11.19

Карбутов Александр Алексеевич

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена докторская / кандидатская диссертация: 01.04.21 – Лазерная физика / 01.04.03 – Радиофизика, включая квантовую радиофизику.

Адрес места работы: Д.1, стр.62, ул.Ленинские горы, г.Москва, 119991, Россия

Международный учебно-научный лазерный центр МГУ имени М.В.Ломоносова

Сайт организации: <http://www.ilc.msu.ru/>

E-mail: aak@optoacoustics.ru

Подпись профессора МЛЦ МГУ д.ф.-м.н. А.А. Карбутова удостоверяю.
Директор МЛЦ МГУ,
Профессор

В.А. Макаров

05.12.19



МАКАРОВ В.А.