



ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации Макалкина Дмитрия Ильича
«Динамика межфазных границ, сепарирование и абляция в
двухкомпонентных конденсированных средах под действием ультразвука»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.07 – физика
конденсированного состояния

Диссертационная работа Д.И. Макалкина посвящена экспериментальному исследованию обусловленных ультразвуковым воздействием особенностей движений границы жидкостей, заключенных в малый объем, а также эффектов сепарирования и абляции в двухкомпонентных конденсированных средах. Тематика диссертации лежит в русле актуальных направлений исследований конденсированных сред с использованием ультразвука мегагерцового диапазона. Низкоинтенсивный ультразвук таких частот широко используется в качестве диагностического инструмента в научных исследованиях, медицине, неразрушающем контроле и ряде других областей. Высокоинтенсивный ультразвук не менее востребован, будучи способным оказывать силовое воздействие на жидкие и твердые конденсированные среды. Например, с помощью ультразвуковых литотриптеров успешно проводят операции *in vivo* по дроблению опасных для здоровья конкрементов в организме. Ультразвуковые методы распыления жидкостей, создания аэрозолей и эмульсий, очистки изделий, ультразвуковые хирургические ножи - все это хорошо известные примеры промышленно и коммерчески значимых эффектов использования мощного ультразвука. Наряду с этим в последнее время активно развивается еще одна область применения ультразвука в новом классе микроустройств, называемых «лаборатория-на-чипе». Перспективность использования в них ультразвука обусловлена тем, что с его помощью можно дистанционно совершать в автоматическом режиме необходимые функциональные операции и манипуляции с малыми объемами вещества, например, перемещать одиночные

клетки и даже их отдельные компоненты. Далее, поиск и разработка новых методов, позволяющих измерять параметры жидких сред с большей точностью и в различных, не обязательно обычных, лабораторных условиях, является актуальной проблемой как для фундаментальных исследований по физике жидкостей, так и для прикладных задач, возникающих, например, в биомедицине, нефтедобыче и нефтехимии. Важным примером такого рода задач является измерение с высокой точностью малых значений коэффициента межфазного натяжения (КМФН), которые характерны для ряда несмешиваемых и бинарных жидкостей. Для последних высокая точность определения КМФН особенно важна, т.к. значение этого параметра с приближением к температуре полного растворения жидкостей друг в друге стремится к нулю. Таким образом, актуальность задач, рассматриваемых в диссертации Д.И. Макалкина, не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы.

Во Введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, защищаемые положения, описана апробация результатов диссертации с перечислением докладов по теме диссертации на российских и международных конференциях.

В начале первой главы приводится литературный обзор исследований воздействия ультразвука на границы жидких стратифицированных сред. Сделан вывод о том, что в случае маловязких несмешивающихся жидкостей, находящихся в малом объеме, особенности такого воздействия изучены недостаточно. Далее рассмотрена постановка задач и соответствующие эксперименты по воздействию сфокусированного ультразвукового пучка на границу раздела двух несмешивающихся жидкостей, находящихся в малом объеме. По мере нарастания интенсивности ультразвукового воздействия, автором выделены три его характерных режима. В первом режиме происходят только вынужденные колебания границы; во втором наблюдается эмиссия одиночных капель одинакового размера, причем размером таких капель можно управлять с помощью ультразвука. В третьем режиме реализуется стохастическая эмиссия множественных капель. Также отмечается обнаружение такой особенности, характерной только для колебаний интерфейса жидкостей в малых объемах, как существование порога возбуждения колебаний низшей симметричной моды.

В начале второй главы представлен краткий обзор литературы по методам измерения КМФН несмешивающихся и бинарных жидкостей. Из материалов обзора следует, что разработка метода, позволяющего за несколько секунд проводить измерения малых значений КМФН с высокой точностью в условиях микрогравитации, является одной из насущных задач физики жидкостей, особенно востребованных для бинарных жидкостей. Как результат проведенной работы далее во второй главе описан метод определения малых ($\sim 10^{-3}$ Н/м) значений КМФН с достаточно высокой ($\sim 5\%$) точностью. Метод основан на высокоскоростной видеозаписи широкополосного возбуждения в условиях микрогравитации бегущих капиллярных волн коротким импульсом ультразвукового пучка, сфокусированного на границу раздела жидкостей, и последующей математической обработке полученных экспериментальных данных.

Во введении к третьей главе, посвященной развитию ультразвукового подхода к сепарированию эритроцитов и плазмы крови, сделан обзор публикаций по методам ультразвуковой манипуляции частицами в жидкости. Основное внимание при этом уделено работам, в которых развиваются идеи построения «лаборатории-на-чипе» с использованием ультразвука. Делается вывод о необходимости использования поверхностных акустических волн (ПАВ) как типа волн, наиболее совместимом с технологией "лаборатории-на-чипе". Далее в главе описаны эксперименты, в которых был впервые реализован эффект сепарирования эритроцитов и плазмы крови человека в поле стоячих поверхностных акустических волн мегагерцевого диапазона. При этом отмечается, что, исходя только из результатов существующей теории, предсказать осуществимость данного эффекта, было невозможно, что повышает значение полученного экспериментальным путем результата.

В литературном обзоре четвертой главы рассмотрены методы получения наночастиц с помощью абляции твердых тел в жидкости. Отмечается, что одна из основных ролей в этом принадлежит схеме лазерной абляции. Исходя из этого, основная идея последующих экспериментов по ультразвуковой абляции состояла в замене воздействия сфокусированного лазерного пучка на воздействие сфокусированного ультразвукового пучка соответствующей энергии. Далее приводится схема такого эксперимента, в которой применяется импульсный ультразвуковой пучок с несущей частотой 1.80 МГц и пиковым перепадом акустического давления в фокусе 50 МПа. В качестве объекта воздействия используется модельный по отношению к конкретным тканям

человека образец, изготовленный из гипсовой смеси. Показано, что среди появившихся в результате ультразвукового воздействия абляционных частиц имеется значительное число частиц, размеры которых лежат в интервале от 20 до 60 нм.

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

Приложение посвящено экспериментальной оценке интенсивности ультразвукового пучка в фокальной плоскости преобразователя.

В диссертации Д.И. Макалкина можно выделить следующие важные и интересные результаты:

1. Экспериментальное обнаружение существования порога возбуждения вынужденных колебаний границы жидкостей для низшей симметричной моды.
2. Реализация ультразвуковой эмиссии прецизионных по размерам одиночных капель и возможность управления их размерами.
3. Предложение и экспериментальная апробация в условиях микрографитации ультразвукового метода, позволяющего оперативно измерять малые ($\sim 10^{-3}$ Н/м) значения коэффициента межфазного натяжения несмешиваемых и бинарных жидкостей с повышенной точностью ($\sim 10^{-4}$ Н/м).
4. Обнаружение значительного числа частиц с размерами в десятки нанометров, образованных в результате ультразвуковой абляции гипсового образца в воде.

Результаты диссертационной работы, помимо научного, могут иметь и прикладное значение в разработках «лабораторий на чипе», создании наночастиц, экспериментах с несмешивающимися и бинарными жидкостями, в том числе и тех, что проводятся на орбитальных станциях в условиях невесомости. Они могут быть использованы в научных исследованиях по физике жидкостей, гидродинамике, нелинейной и параметрической акустике, выполняемых в Институте прикладной физики РАН, Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Акустическом институте им. Н.Н. Андреева, на физическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова, ИПМех РАН, МИРЭА, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Вместе с тем, по диссертации Д.И. Макалкина можно сделать ряд замечаний:

1. Изложение обзоров литературы, приводимых в начале каждой главы, выполнено в слишком сжатой форме, от чего страдает необходимое для

кандидатских диссертаций качество таких обзоров. В частности, в четвертой главе спектр публикаций по методам создания наночастиц, в особенности с помощью ультразвуковых методов, должен быть отражен с большей полнотой и тщательностью.

2. Во второй главе и в Приложении недостаточно подробно описаны процедуры математической обработки экспериментальных данных и построения необходимых для вычисления КМФН аппроксимаций. Кроме того, в результатах расчетов погрешностей не приведены значения доверительных интервалов и соответствующих вероятностей. Такие же замечания относятся и к представлению в третьей главе результатов измерений периода пространственной структуры, образованной эритроцитами.
3. В тексте работы имеются опечатки и смысловые неточности, а в некоторых рисунках встречаются англоязычные обозначения.

Как видно, отмеченные недостатки не носят принципиального характера, поэтому они не снижают общую положительную оценку представленной к защите работы.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в ведущих российских и зарубежных журналах, входящих в список ВАК и в такие авторитетные международные базы данных, как Web of Science, Scopus (5 статей). Они также прошли апробацию на российских и международных конференциях (6 докладов). Следует отметить, что исследования, проводившиеся в рамках диссертационной работы, были поддержаны российским (РФФИ) и зарубежным (стипендия В.И. Вернадского посольства Франции в Москве) грантами.

В целом диссертация Д.И. Макалкина является законченным научным исследованием, сочетающим в себе применение эффективных экспериментальных методов исследования и решения поставленных задач с современными методами математической обработки полученных экспериментальных данных. Полученные в диссертации результаты являются новыми, а их достоверность не вызывает сомнений.

Автореферат диссертации соответствует содержанию работы и полностью отражает ее основные результаты.

Таким образом, диссертационная работа Д.И. Макалкина «Динамика межфазных границ, сепарирование и абляция в двухкомпонентных конденсированных средах под действием ультразвука» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени