

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. Ломоносова

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

УДК 534.2

БЕГАРЬ Анна Вадимовна

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КАПЕЛЬ И МАЛЫХ ОБЪЕКТОВ С
ПОВЕРХНОСТНЫМИ АКУСТИЧЕСКИМИ ВОЛНАМИ**

Специальность 01.04.06 – акустика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре акустики физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Владимир Геннадиевич Можаев.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор

Владимир Иванович Балакший (кафедра физики колебаний физического факультета МГУ),

кандидат физико-математических наук

Вадим Моисеевич Левин (зав. лабораторией акустической микроскопии Института биохимической физики РАН).

Ведущая организация:

Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН.

Защита состоится «_27_» _июня_ 2013 года в _10_ часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.67 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, центральная физическая аудитория им. Р.В. Хохлова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан « _24_ » __мая__ 2013 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 501.001.67

кандидат физико-математических наук, доцент

А.Ф. Королев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НАУЧНОГО НАПРАВЛЕНИЯ И ЕГО АКТУАЛЬНОСТЬ

Устойчивой тенденцией в развитии многих естественных наук, таких как биология, химия, и физика, является изучение объектов все меньших и меньших размеров. На современном этапе эта тенденция проявляется в создании и развитии нанотехнологий и микроэлектромеханических систем, исследованию которых с каждым годом уделяется все большее внимание во всех развитых странах мира. Исключительно важную роль в этих исследованиях играют методы тонкого физического воздействия на материальные объекты. Актуальной и сложной научно-технической проблемой, связанной с использованием таких воздействий, является разработка и создание миниатюрных многофункциональных автоматизированных устройств, получивших название «лабораторий на чипах» или «программируемых биочипов» или кратко просто «биочипов» (здесь и далее эти термины используется как синонимы). Программируемые биочипы представляют собой обширный класс новых микроэлектронных устройств, предназначенных для проведения в автоматическом режиме и в масштабе реального времени быстрых химических и биологических анализов жидких растворов с очень малым объемом (порядка микро- и нанолитров), а также оперативного синтеза таких растворов.

В качестве движущей силы в программируемых биочипах используются как электрические/магнитные воздействия, так и акустические. Идея создания «лабораторий на чипах» с акустической движущей силой была предложена в 2000 году профессором Мюнхенского университета *А. Виксфорсом* и его бывшими аспирантами *Ю. Скрибой* и *К. Гайером*. В ноябре 2000 года они учредили в Германии специализированную фирму «Advalytix». Название ее образовано комбинацией английских слов *advanced* и *analytics* и в переводе на русский может быть расшифровано как «Передовые методы анализа». Деятельность данной фирмы в основном была нацелена на создание прототипов и малосерийный выпуск акустических биочипов. Инициатива немецких

специалистов по созданию акустических лабораторий на чипах и изучению протекающих в них процессов была подхвачена многими зарубежными учеными, и в настоящее время исследования в этом направлении активно проводятся в разных странах мира. Акустические волны в таких устройствах могут использоваться как для пространственного перемещения материальных объектов, так и для контролируемого деления и нагрева микрокапель, интенсификации в них биохимических реакций, эмульгирования и распыления капель, сушки и очистки рабочих поверхностей, а также измерения параметров и свойств капель. Следует, однако, отметить, что в продукции фирмы «Advalytix» акустические волны преимущественно использовались лишь для создания в каплях вихревых акустических течений с целью ускорения протекающих в них химических или биологических процессов.

Ожидается, что разработка, создание и массовый выпуск многофункциональных и высокоэффективных программируемых акустических биочипов, обладающих широкими возможностями проведения разнообразных химических и биологических анализов, а также синтеза растворов с заданными свойствами, может вызвать кардинальные улучшения и революционные изменения в аппаратных средствах современной медицины, фармакологии, молекулярной биологии, микро- и нанохимии. Однако, разработка и создание лабораторий на чипах представляет собой весьма сложную проблему, лежащую на стыке различных областей знаний, включающих физику, химию, микроэлектронику, механику, биологию и медицину. На пути решения этой комплексной проблемы - немало трудностей и есть еще много нерешенных задач. Хотя поверхностные акустические волны (ПАВ) ультразвуковых частот уже используются в опытных образцах лабораторий на чипах, тем не менее, остается еще много неясного в вопросе о физических механизмах взаимодействия капель различных растворов с поверхностными акустическими волнами на пьезоэлектрических подложках. В частности, к числу актуальных, но недостаточно изученных вопросов относятся механизмы акустического транспорта капель, динамическое искажение их формы, воздействие капель на

сами акустические поля, а также свойства резонансных колебаний капель, прижатых силой тяжести к подложке.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Общей целью настоящей диссертационной работы является выявление и изучение новых физических особенностей взаимодействия капель и малых объектов с поверхностными акустическими волнами на твердотельных подложках с целью улучшения понимания физических процессов, протекающих при функционировании акустических «лабораторий на чипах».

ЗАДАЧИ РАБОТЫ

В качестве основных задач работы для достижения поставленной цели были выбраны:

1. Экспериментальное и теоретическое изучение транспорта капель под действием бегущих поверхностных акустических волн на пьезокристаллических ультразвуковых линиях задержки. Анализ влияния следа растекшейся капли на распределение акустических полей в кристаллической подложке.
2. Экспериментальное и теоретическое изучение искажения формы капли при воздействии встречных квазистоячих поверхностных акустических волн на пьезокристаллических ультразвуковых линиях задержки.
3. Экспериментальное и теоретическое изучение динамики формы поверхности капли при воздействии бегущих поверхностных акустических волн на наклонных пьезокристаллических ультразвуковых линиях задержки.
4. Теоретическое исследование транспорта малых объектов при воздействии волновых импульсов.
5. Развитие теории локализованных резонансных колебаний в капле, прижатой силой тяжести к твердотельной подложке.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ

1. В работе экспериментально наблюдались два новых физических эффекта. Один из них состоит в образовании солитоноподобного квазистационарного пика на поверхности капли в поле встречных поверхностных акустических волн. Другим являются автоколебания в капле, лежащей на наклонной подложке, при воздействии на каплю бегущих поверхностных акустических волн.

2. Теоретически установлена новая возможность достижения транспорта малых объектов при чисто линейном воздействии на них волновых импульсов. Показано, что в отличие от известных нелинейных механизмов для изучаемого механизма реализуется двунаправленность транспорта, управляемая лишь при помощи изменения фазовых соотношений без изменения направления распространения волнового импульса.

3. На примере поверхностных акустических волн, распространяющихся под следом капли на анизотропных подложках, и сдвиговых волн в кристаллах с градиентом плотности предсказан новый эффект резкого усиления волноводной локализации в условиях, когда анизотропия подавляет дифракцию.

4. Объяснены причины и построена теория краевой локализации капиллярных резонансных колебаний в капле на подложке в предельном случае несмачиваемой поверхности. На основе аналогии формы капли и лазерных резонаторов выявлена и описана локализация толщинных акустических резонансов в капле на подложке.

НАУЧНАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ

Любое наблюдение новых эффектов и явлений расширяет наши представления об окружающем мире, и в этом отношении два новых эффекта, экспериментально обнаруженных в данной работе, несомненно, имеют большое научное значение. С другой стороны, исследования, проведенные в диссертационной работе, были инициированы перспективными практическими

применениями акустических волн в «лабораториях на чипах». Поэтому полученные результаты имеют и практическую значимость для разработки, создания и оптимизации отмеченных устройств. В частности, изучаемые в работе эффекты важны для правильной интерпретации сложных процессов, протекающих в акустических биочипах. Например, проведенное в работе исследование пространственной неоднородности распределения акустических полей в биочипах важно, поскольку эффективность функционирования этих устройств напрямую определяется амплитудой возбуждаемых в них акустических волн. Развитая теория импульсно-колебательного транспорта объясняет и описывает особенности электрофореза и диэлектрофореза в поле электростатических волн, которые ранее наблюдались при численном моделировании и в эксперименте, но не были объяснены, а оба этих процесса используются в практических целях, например, для разделения частиц или биологических клеток по свойствам и размерам, а также для их транспорта. Важность проведенного в работе изучения резонансов в капле обусловлена тем, что эффективность протекания физических процессов в резонансных условиях может многократно возрасти.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Воздействие встречных высокочастотных поверхностных акустических волн большой амплитуды на каплю, лежащую на подложке, как показывает проведенный эксперимент, приводит к квазистационарному искажению ее формы с образованием в центре солитонообразного пика.
2. Воздействие высокочастотных поверхностных акустических волн большой амплитуды, бегущих по наклонной подложке от нижнего края к верхнему, как показывает проведенный эксперимент, приводит к возбуждению в капле, лежащей на подложке, низкочастотных автоколебаний. Эти автоколебания имеют вид периодического образования и движения микрокапелек по поверхности исходной капли от ее нижнего края к верхнему с последующим их расплыванием на верхнем крае и стеканием вниз.

3. Поступательный транспорт малых по сравнению с длиной волны объектов согласно проведенному теоретическому анализу принципиально возможен за счет линейных по амплитуде волны импульсно-волновых воздействий, т.е. возможен в условиях, когда средняя по времени сила воздействия на объект равна нулю. Двухнаправленность такого транспорта достигается без изменения направления распространения волн, а лишь при помощи сдвига фазы несущей волны относительно начала импульсной огибающей.

4. Анизотропия акустических свойств подложки автоколлимационного типа, как предсказывает развитая модельная теория, приводит к резкому усилению локализации волн Рэля под следом капли, растекшейся на подложке.

5. Наблюдаемая в эксперименте краевая локализации волновых колебаний в капле Лейденфроста объясняется на основе представленного теоретического анализа эффектом геодезической линзы (максимальностью длины пути волновых лучей по экватору капли в сравнении с параллельными экватору, но смещенными от него траекториями). Влияние же кривизны поверхности капли на скорость капиллярных волн является при этом, как показывают оценки, второстепенным фактором.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Результаты проведенных исследований докладывались и обсуждались на ряде научных встреч, в число которых входят: Международные конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам "Ломоносов-2004", "Ломоносов-2005", "Ломоносов-2009" (Москва), Всероссийские научные школы-семинары "Волны-2004", "Волны-2008", "Волны-2013" (Подмосковье), IEEE International UFFC Joint 50th Anniversary Conference (Монреаль, Канада, 2004), 17th International Symposium on Nonlinear Acoustics (Стейт Колледж, США, 2005), Форум "Всемирный год физики в Московском университете" - конференция молодых ученых (Москва, 2005), IEEE International Ultrasonics Symposium (Роттердам, Нидерланды, 2005; Рим,

Италия, 2009), Advanced School "Flow and Transport in Microchannels: Fundamental Theoretical Aspects, Experimental Methods, Application" (Удине, Италия, 2005), сессии Российского акустического общества (Москва, 2005; Нижний Новгород, 2007), MicroNanoacoustics Workshop (Прато, Италия, 2009).

Результаты работы также докладывались и обсуждались на семинарах кафедры акустики физического факультета МГУ (2004-2013), Лаборатории волн и акустики (LOA) (Париж, Франция, 2005), Лаборатории физики и метрологии осцилляторов (LPMO) (Безансон, Франция, 2006), Лаборатории физической механики (LPM) (Бордо, Франция, 2006), Лаборатории акустики Университета Мена (LAUM) (Ле-Ман, Франция, 2005, 2007), семинаре теоретического отдела ИОФАН под руководством А.А. Рухадзе (Москва, 2010), заседании научно-квалификационного семинара ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (Москва, 2013).

ПУБЛИКАЦИИ

По теме диссертации опубликовано в журналах и сборниках 21 печатная работа (из них 4 статьи в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК).

ВКЛАД АВТОРА

Все материалы, вошедшие в данную диссертационную работу, подготовлены либо лично автором, либо совместно с соавторами работ, опубликованных по теме диссертации.

СТРУКТУРА И ОБЪЁМ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем составляет 174 страницы, включая 41 рисунок, 3 таблицы и 208 библиографических ссылок. Система обозначений, используемая в каждой из глав диссертационной работы, является относительно самостоятельной и объясняется в начале глав.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** представлен обзор литературы по теме работы.

В **первом параграфе** описаны различные типы взаимодействий поверхностных акустических волн с малыми объемами жидкости. Обсуждаются акустические датчики для измерения параметров жидкости. Здесь же приведена информация об известных свойствах акустических волн на границе твердого тела и жидкости. Кратко описаны основные эффекты воздействия поверхностных акустических волн на капли, включая их транспорт, ультразвуковое распыление и генерацию в них вихревых акустических течений.

Второй параграф посвящен обсуждению различных известных механизмов волнового транспорта материальных объектов. Сюда входят акустические течения, движение капель под действием колебаний в условиях гистерезиса сил поверхностного натяжения, образование фигур Хладни, транспорт протяженных объектов за счет эллиптического движения частиц на поверхности подложки при распространении в ней акустических волн, транспорт заряженных или диэлектрических частиц в поле «бегущих электростатических волн», движение броуновских частиц при случайных воздействиях в средах с пространственной асимметрией свойств.

В **третьем параграфе** рассматриваются работы о поверхностных колебаниях тел сферической и сфероидальной формы, к которым относятся капиллярные колебания капель, пузырьков, и распространение волн Рэлея по сфере. Обсуждаются также исследования толщинных акустических резонансов в капле на подложке.

В **четвертом параграфе** приведены общие выводы по анализу литературы в контексте изучаемых в диссертации задач.

Во второй главе излагаются результаты проведенных в диссертационной работе оригинальных экспериментальных и теоретических исследований взаимодействия капель и поверхностных акустических волн на пьезокристаллических подложках.

В **пятом параграфе** представлены схема экспериментальной установки и методика проведения эксперимента. В **шестом параграфе** описаны эксперименты по направленному растеканию капель под действием бегущих ПАВ, а также вихревым акустическим течениям внутри капель. В целом эти наблюдения согласуются с результатами других авторов. Результаты наблюдения направленного растекания капель были затем использованы при постановке задачи теоретического исследования, описанного в **седьмом параграфе**. Этот параграф посвящен изучению волноводной локализации волн Рэлея под следом растекшейся капли (рис. 1).

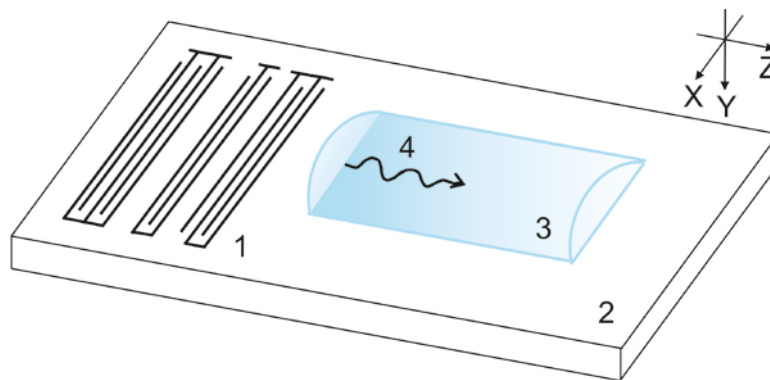


Рис. 1. Распространение поверхностных акустических волн под растекшейся каплей: 1 - встречно-штыревые преобразователи (ВШП), 2 - подложка, 3 - слой жидкости, 4 - волны Рэлея.

Для исследования влияния на волны Рэлея тонкого следа капли с шириной несколько длин волн в случае, когда подложка является изотропной или ее анизотропия пренебрежимо мала, используется модельное скалярное уравнение Гельмгольца

$$\left(\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial z^2 + k^2\right)\psi = 0, \quad (1)$$

где ψ - волновая функция. Входящее в (1) волновое число волн Рэлея считается возмущенным из-за присутствия жидкого слоя $k = k_0 + \Delta k$, $\Delta k \sim h$. Изменения толщины слоя в поперечном направлении аппроксимируются параболой $h = h_0(1 - \beta x^2)$, x - отклонение от оси следа капли, h_0 - максимальная толщина следа; β - масштабный коэффициент. Решение для пространственного распределения поля волноводных мод имеет вид

$$\psi_n(\xi) \sim \exp(-\xi^2/2)H_n(\xi), \quad (2)$$

где $H_n(\xi)$ - полиномы Эрмита n -го порядка ($n = 0, 1, 2, \dots$), а $\xi \sim x$. Для изучения влияния анизотропии среды на локализацию волн Рэлея удобно воспользоваться парааксиальным параболическим приближением. В этом случае зависимость фазовой скорости v от угла θ отклонения направления распространения от оси Z аппроксимируется формулой

$$v(\theta)/v(0) = 1 + (\gamma/2)\theta^2, \quad (3)$$

где γ - коэффициент параболической аппроксимации. Анизотропная модификация решения показывает, что $\xi \sim x(1 + \gamma)^{-1/4}$, т.е. анизотропия параболического типа влияет лишь на масштаб изменения поля волноводных мод в поперечном направлении, но не меняет формы решения, характерной для изотропной среды (рис. 2). Наиболее интересный случай сверхсильного сжатия пучков реализуется при значениях γ , близких к -1 . В этом случае масштабный

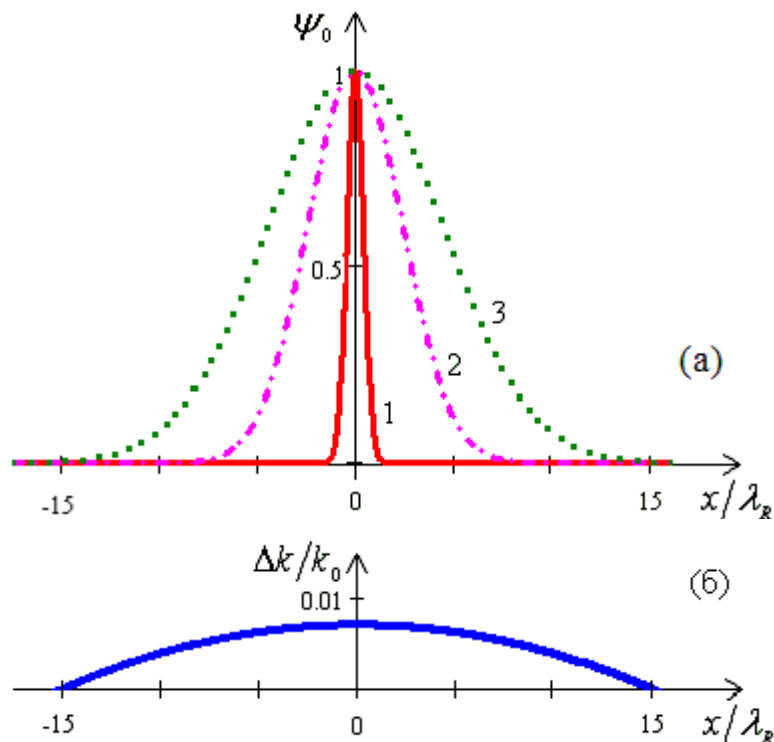


Рис. 2. Поперечное распределение в микрожидкостном канале с шириной, равной $30\lambda_R$: а) поля нулевой волноводной моды Рэлея без и с учетом анизотропии подложки, кривая 1 - $\gamma = -0,906$, кривая 2 - $\gamma = -0,454$, кривая 3 - $\gamma = 0$; б) локального волнового числа волн Рэлея $\Delta k/k_0$.

коэффициент стремится к бесконечности, а волноводные пучки приобретают необычную иглообразную форму. Представленный анализ имеет, конечно, ограничения в отношении точности количественного описания узких пучков с широким пространственным спектром. Тем не менее, его качественные выводы о резком сужении волноводных пучков должны оставаться верными и в этом предельном случае. Таким образом, учет акустической анизотропии подложки показал многократное усиление степени волноводной локализации поверхностных акустических волн под следом капли с квадратичным профилем в случае, когда анизотропия среды создает условия автоколлимации волноводного пучка. Данный эффект позволяет рассчитывать параметры ряда низших волноводных мод Рэлея под следом капли в пренебрежении конечностью ширины следа.

В **восьмом параграфе** представлены результаты экспериментального наблюдения и анализа нового эффекта возникновения квазистационарного солитоноподобного пика на капле объемом 4-8 мкл при воздействии двух встречных ПАВ частотой 15 МГц (рис. 3а). Поступательное перемещение всей капли как целого не наблюдалось, а ее профиль при этом выглядел, как показано на рис. 3б. На тонком пьедестале толщиной порядка 50-100 мкм возникал пик (солитоноподобное образование с высотой, на порядок большей толщины пьедестала), который сравнительно медленно перемещался или

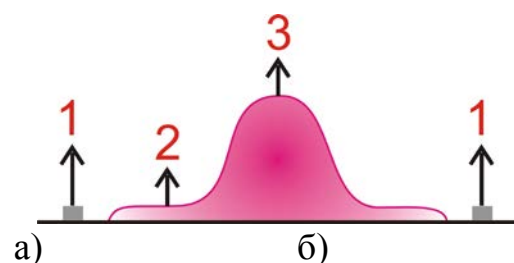
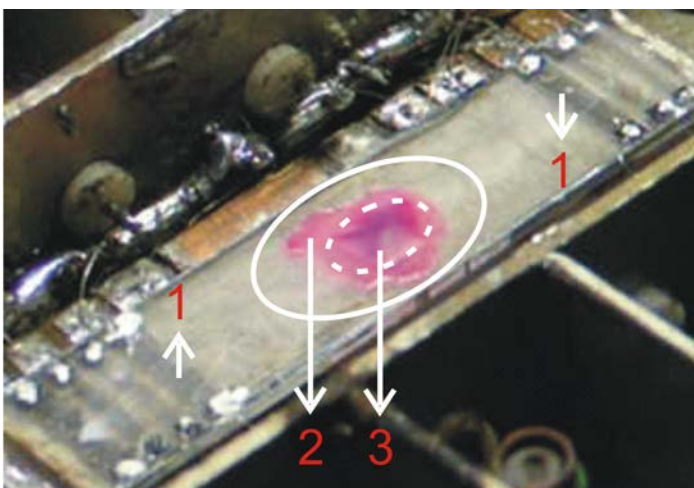


Рис. 3. а) Фотография капли с пиком на ней: 1 - ВШП, 2 - пьедестал капли, 3 - пик на капле; б) эскиз профиля капли.

совершал хаотические колебательные движения при высыхании капли в пределах пьедестала. В эксперименте использовались следующие жидкости, характеризующиеся высокой смачиваемостью подложки из ниобата лития: ацетон, этиловый спирт, уайт-спирит. Дано упрощенное теоретическое описание этого эффекта на основе анализа сил акустического радиационного давления, создаваемого в капле (жидком полупространстве) встречными рэлеевскими волнами утечки (рис. 4). Согласно проведенным расчетам суммарная сила

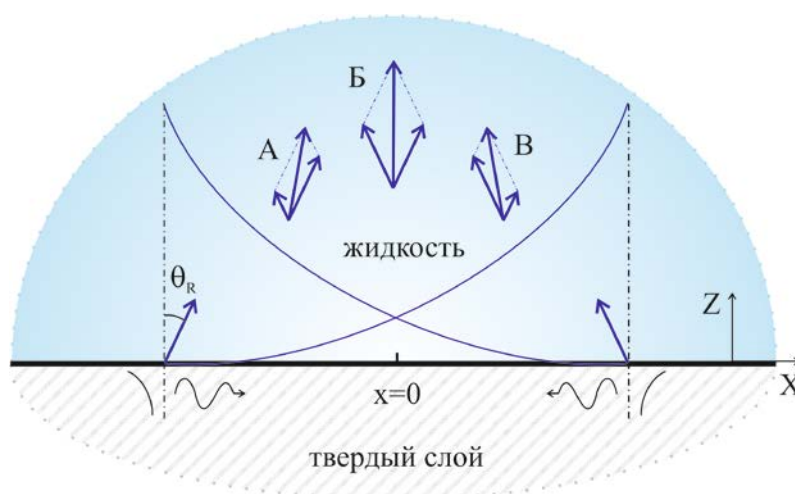


Рис. 4. Силы акустического радиационного давления в поле встречных рэлеевских волн утечки.

радиационного давления направлена строго вверх там, где встречные волны имеют одинаковую амплитуду. Смещение в сторону от этого места приводит к наклону силы радиационного давления в направлении, противоположном отклонению, что создает восходящий поток жидкости с локализацией в месте равенства амплитуд встречных волн.

В **девятом параграфе** изложены результаты экспериментального наблюдения и анализа другого нового эффекта. Этот эффект состоит в возбуждении низкочастотных автоколебаний в капле на наклонной пьезоэлектрической подложке при воздействии ПАВ, бегущих от нижнего края подложки к верхнему. ПАВ рэлеевского типа возбуждались в непрерывном режиме на частоте 15 МГц. На поверхность кристалла YZ-LiNbO₃ перед ВШП наносилась капля растворителя уайт-спирит или этилового спирта площадью около 8x15 мм² (рис. 5а). При малом наклоне подложки на 5° перемещение

капли как целого прекращалось, но наблюдалась следующая необычная автоколебательная динамика формы ее поверхности (рис. 5б). Вблизи нижнего края основной капли скапливалась жидкость, стекающая с нее под действием силы тяжести. При достижении слоем этой жидкости некой критической толщины на нем скачкообразным образом возникал микровыступ, подобный малой капле, которая быстро перемещалась вверх по основной капле (рис. 5в).

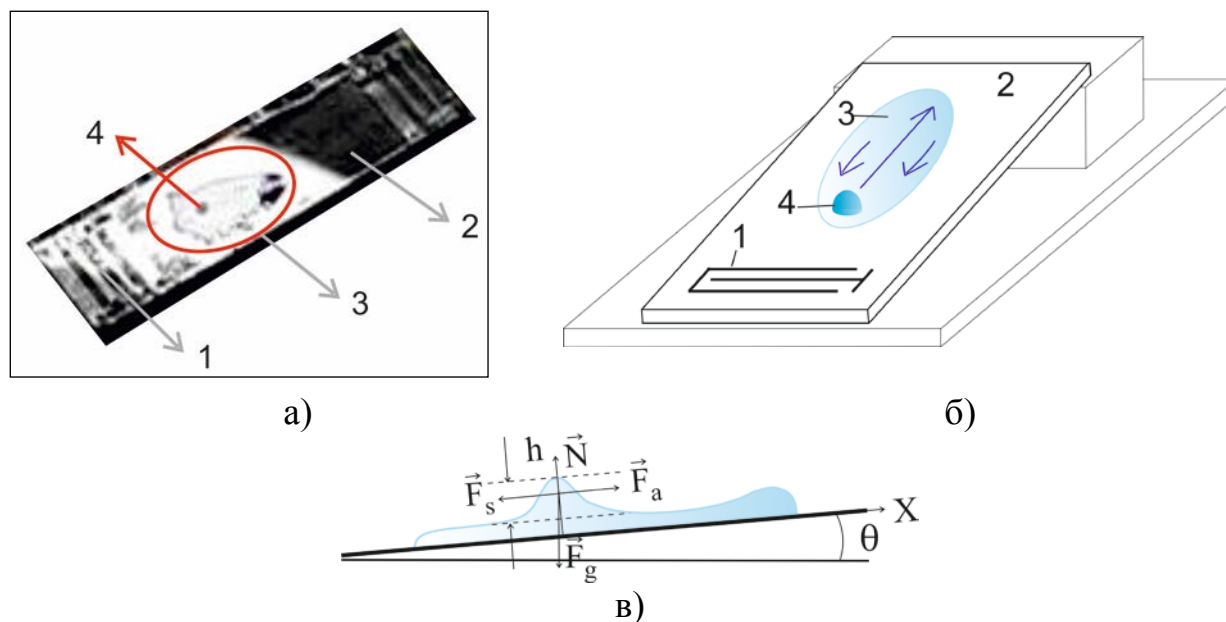


Рис. 5. Автоколебания формы поверхности капли на наклонном пьезокристалле под действием бегущих поверхностных волн: а) фрагмент из видеофильма: 1 - ВШП, 2 - подложка, 3 - капля жидкости, 4 - локальное динамическое образование (малая капля) на ней; б) схема эксперимента (стрелками указана траектория движения малой капли); в) вид сбоку на профиль капли.

В момент достижения верхнего края основной капли малая капля мгновенно расплывалась, а перемещенная ею вверх жидкость начинала медленно стекать вниз по основной капле. Весь этот процесс периодически повторялся с частотой порядка 1-4 Гц при мощности ПАВ 0,1 Вт. Моделирование перемещения микрокапли по подложке вверх с помощью линеаризованного уравнения движения показывает, что в соответствии с экспериментом скорость перемещения практически постоянна. При смещении положения основной капли относительно центральной оси подложки наблюдалось круговое движение малой капли по краю основной.

В третьей главе изучается новый импульсно-колебательный механизм волнового транспорта малых по сравнению с длиной волны объектов. В десятом параграфе описана используемая одномерная модель (рис. 6).

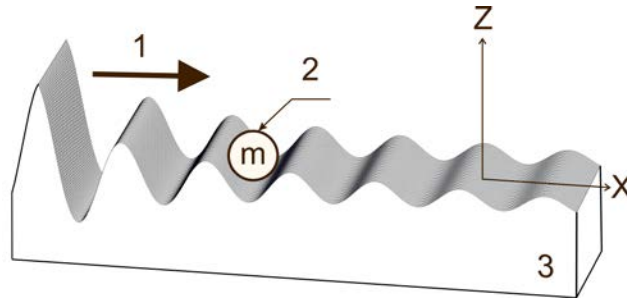


Рис. 6. Геометрия задачи о волновом перемещении микрообъекта: 1 - ПАВ, 2 - микрообъект, 3 - подложка.

В силу малости перемещаемого объекта он заменяется материальной точкой. В общем случае в уравнении движения учитываются силы инерции, сопротивления среды и воздействия электрических полей, сопровождающих акустические волны в пьезоподложке. Причем учитываются только линейные по амплитуде волнового воздействия силы, действующие на объект. Уравнение движения частицы, перемещаемой вдоль оси X, для такой одномерной модели можно записать в виде

$$\ddot{x} + \gamma \dot{x} = (F_0/m) \sin(\omega t + \varphi), \quad (4)$$

где γ - параметр, характеризующий силу сопротивления среды (силу вязкого трения); произведение $m\gamma$ равно коэффициенту вязкого трения; $F_0 = F_0(t)$ - амплитуда суммарных сил (механических и электрических), действующих на частицу со стороны волны; $\varphi = \varphi(x, t) = -kx + \varphi_0$, ω и k - циклическая частота и волновое число несущей волны, φ_0 - сдвиг фазы несущей относительно начала импульса. Значение координаты $x = x(t)$ определяет текущее положение частицы. В случае пренебрежения сопротивлением среды и воздействия волновых импульсов с прямоугольной огибающей нелинейное уравнение движения, как показано в одиннадцатом параграфе, интегрируется точно. Из второго интеграла этого уравнения, выражаемого через неполный

эллиптический интеграл первого рода, следует, что движение объекта происходит колебательным образом в общем случае одновременно и в прямом, и обратном направлениях. Преимущественное движение в заданном направлении, как следует из первого интеграла, достигается при специальном выборе фазы несущей волны φ_0 относительно начала огибающей волновых импульсов. При оптимальном выборе $\varphi_0 = 0$ движение объекта в обратном направлении по отношению к основному направлению транспорта полностью устраняется. Существенной новой особенностью рассматриваемого механизма волнового транспорта (по сравнению с хорошо известными нелинейными механизмами типа акустических течений) является возможность инвертирования направления перемещения объекта при сохранении прежнего направления распространения волны только за счет изменения указанного выше фазового сдвига. Здесь же показано, что малость скорости поступательного движения объекта относительно скорости распространения волновых импульсов позволяет приближенно интегрировать уравнение движения, пренебрегая зависимостью фазы волны от координаты перемещаемого объекта. Далее такое приближенное интегрирование используется для изучения более сложных задач. В **параграфе 12** представлены результаты приближенного исследования транспорта объектов под действием импульсов с различной формой огибающей в случае учета сопротивления среды. Рассматриваются импульсы с прямоугольной огибающей (рис. 7а) и огибающей в виде произведения прямоугольной и экспоненциальной функций (рис. 7б), с огибающей в виде разности двух экспонент (рис. 7в), в виде произведения линейной функции времени на экспоненциально убывающую (рис. 7г), с гармонической огибающей (рис. 7д). Установлено, что нежелательное обратное движение объекта по отношению к основному направлению его перемещения уменьшается при использовании экспоненциальной огибающей, а в случае ее оптимизации оно полностью устраняется (рис. 8). Значения оптимального и неоптимального фазовых сдвигов, определенные для случая прямоугольной огибающей, сохраняются и

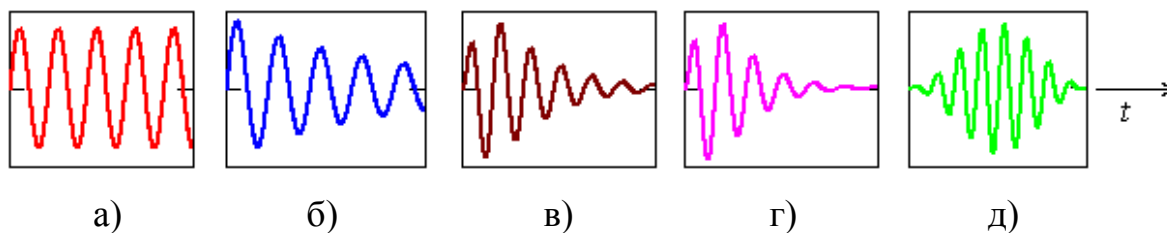


Рис. 7. Формы рассматриваемых импульсов (а-д).

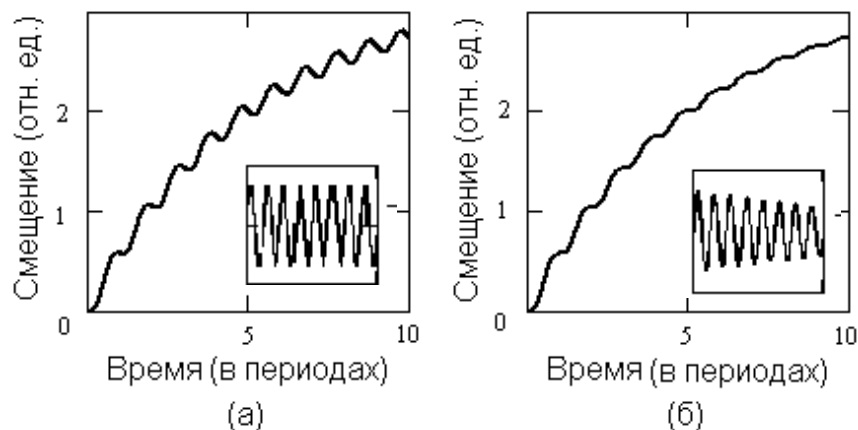


Рис. 8. Зависимость положения частицы x от времени t/T при учете сил сопротивления среды и оптимальной фазе несущей $\varphi_0 = 0$: а) прямоугольная огибающая; б) прямоугольная огибающая с экспоненциальным спадом.

для более сложных форм импульсов. С качественной точки зрения оптимальное значение фазового сдвига, при котором средняя поступательная скорость максимальна, соответствует асимметричным (по времени) импульсам, а неоптимальное значение, при котором лишь происходят колебания на месте, - симметричным. Показано, в частности, что импульс в форме «мексиканской шляпы» не создает направленного транспорта, что объясняется его симметричностью. В отношении временной асимметрии импульсов, требуемых для достижения оптимума, изучаемый механизм импульсно-волнового транспорта вполне аналогичен механизму движения броуновских частиц, для направленного поступательного движения которых требуется пространственная асимметрия свойств среды. **Тринадцатый параграф** описывает теорию транспорта малого объекта при двухчастотном импульсном воздействии. Понятия оптимального и неоптимального фазовых сдвигов, определенные в одиннадцатом параграфе, сохраняются и в случае воздействия двух импульсов на основной и второй гармониках с различными формами огибающих.

В четырнадцатом параграфе представлен теоретический анализ двумерной задачи перемещения малой заряженной или диэлектрической, электрически нейтральной частицы в текучей среде в поле «бегущих электростатических волн», сопровождающих акустические волны в пьезоэлектрике (рис. 9).

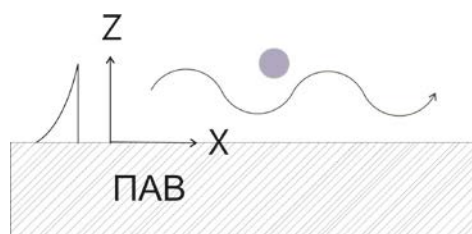


Рис. 9. Диэлектрическая частица в поле «бегущих электростатических волн».

Несмотря на усложнение задачи по сравнению с рассмотренным ранее одномерным случаем, уравнения движения и здесь удастся один раз проинтегрировать точно. Из найденного первого интеграла следует, что основные выводы одномерной теории, такие как значения оптимальной и неоптимальной фазы, а также двунаправленность транспорта сохраняются и в двумерном случае. Точные и приближенные аналитические решения, полученные в двумерном и одномерном случае, объясняют и описывают возможную причину обратного транспорта при электрофорезе и диэлектрофорезе в поле электростатических волн, ранее наблюдавшегося при численном моделировании и в эксперименте, но остававшегося до сих пор необъясненным.

Таким образом, в данной главе установлено, что поступательное перемещение малого объекта при импульсном волновом или колебательном воздействии на него возможно даже в том случае, когда средняя по времени вынуждающая сила, действующая на объект, равна нулю.

Четвертая глава посвящена изучению локализованных капиллярных и акустических мод колебаний в капле, прижатой силой тяжести к подложке. Форма капли определяется ее размерами и степенью смачиваемости подложки. С целью упрощения анализа рассмотрены резонансы в капле в предельных случаях несмачиваемой и хорошо смачиваемой поверхности.

На несмачиваемой поверхности капля приобретает сфероидальную форму. Хорошей моделью для этого случая служит капля Лейденфроста - капля, находящаяся на сильно перегретой поверхности и левитирующая на своей паровой подушке (рис. 10а). В **параграфе 15** экспериментально и теоретически изучается краевая локализация собственных капиллярных колебаний в такой капле. Зарегистрированные с помощью видеозаписи самоиндуцированные краевые колебания в капле воды, помещенной на раскаленную плиту (рис. 10б), коррелируют с результатами наблюдений предшествующих авторов (Batdorf; Holter и ряд других).



а)



б)

Рис. 10. а) схематическое изображение капли Лейденфроста; б) фотография колебаний сфероидальной капли, диаметром около 12 мм.

Для объяснения наблюдаемой краевой локализации теоретически изучено влияние двух факторов.

Первый фактор - это зависимость скорости капиллярных волн от кривизны поверхности. Для нахождения данной зависимости рассмотрена вспомогательная задача о распространении капиллярных волн по жидкой струе с радиусом кривизны поверхности, много большим длины волны. Разложение возмущения волнового числа из-за кривизны в ряд Тейлора по малому параметру $1/k_0R$ дает

$$\frac{\Delta k}{k} = \frac{A_t}{k_0 R_t} + \frac{A_r}{k_0 R_r}, \quad (5)$$

где A_t - коэффициент, отвечающий за влияние продольной по отношению к волновому вектору кривизны, а A_r - поперечной, R_t, R_r - соответствующие

радиусы кривизны. При распространения капиллярных волн поперек струи $1/R_t = 0$, а A_t в первом порядке приближения по малому параметру оказался равным нулю. Таким образом, в отличие от волн Рэлея в твердом теле слабая кривизна поверхности в первом порядке приближения по малому параметру не влияет на скорость распространения капиллярных волн, бегущих поперек струи. В случае распространения капиллярных волн вдоль струи $1/R_t = 0$, а $A_t = 1/6$. Полученное выражение для Δk использовано в модельном уравнении (1) для описания локализованных мод в капле. По структурному виду уравнение совпадает с уравнением Шредингера для гармонического осциллятора, а его решение совпадает с (2). Структура поля двух низших (симметричной и антисимметричной) мод краевых колебаний капли показана на рис. 11а. Решение для $n=1$ описывает связанные вертикальные и горизонтальные колебания капли и объясняет послойный процесс перераспределения энергии внутри капли, что действительно наблюдалось в проведенном эксперименте. На рис. 11б приведено схематичное изображение капли (вид сверху) в виде двухслойной структуры из двух «звезд», наложенных одна на другую и антифазно повернутых относительно друг друга.

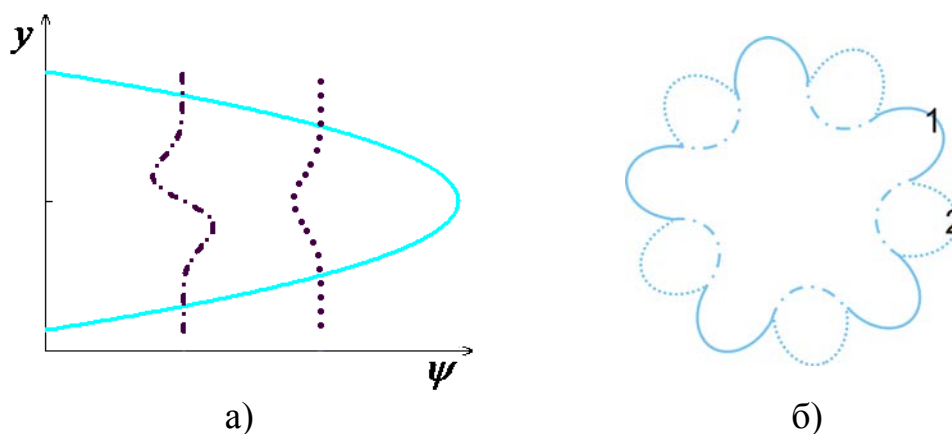


Рис. 11. а) Структура поля двух низших мод краевых колебаний капли Лейденфроста - симметричной с $n=0$ (пунктир) и антисимметричной с $n=1$ (штрих-пунктир), сплошная линия - профиль капли на виде сбоку; б) послойное распределение колебаний в капле (вид сверху): 1 - верхние «лепестки» капли, 2 - нижние.

Вторым фактором, оказывающим влияние на краевую локализацию, является изменение длины пути волновых лучей, параллельных плоскости экватора сфероидальной капли, при смещении от нее (эффект «геодезической линзы»). Самостоятельно этот эффект проявляется в случае сферы, когда скорость поверхностных волн во всех точках одинакова. Известное решение волнового уравнения в сферических координатах показывает, что распределение поля наиболее сильно локализованных у экватора симметричных мод описывается функцией $\sin^n \theta$, а антисимметричных - $\cos \theta \sin^n \theta$, где θ - полярный угол, а n - определяет периодичность изменения поля по азимутальному углу.

Для анализа одновременного влияния на поверхностные волны в телах вращения обоих факторов предлагается использовать модельное уравнение, представляющее собой обобщенное двумерное уравнение Вебстера

$$\left(\Delta_{\perp} + \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial \eta} \frac{\partial}{\partial \eta} + k^2 \right) U = 0. \quad (6)$$

Оператор Δ_{\perp} определяется через поверхностные координаты, в число которых входит длина меридианной дуги η . Вместо площади волновода S , входящей в классическое уравнение Вебстера, в случае поверхностных волн достаточно использовать периметр или радиус поперечных к оси вращения сечений. В сферической системе координат уравнение (6) в точности переходит в двумерное уравнение Гельмгольца на сфере, которое описывает локализованные у экватора волновые резонансы. Применение уравнения (6) в случае слабо деформированной сферы показало, что второй из обсуждаемых факторов является основным и оказывающим доминирующее влияние, притом что его влияние не зависит от знака кривизны. Этим объясняется наблюдаемая экспериментально экваториальная локализация колебаний как в сфероидальной капле, так и в сфероидальном пузыре, несмотря на то, что первый фактор оказывает противоположное влияние на локализацию в этих объектах.

В шестнадцатом параграфе развивается аналитическая теория локализованных толщинных акустических резонансов в тонкой капле жидкости на твердой подложке (рис. 12).

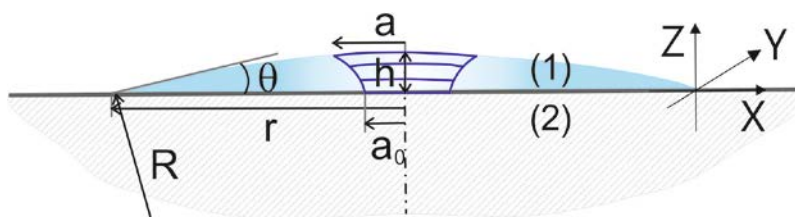


Рис. 12. Локализованные толщинные акустические резонансы в капле на подложке.

Особенностью таких резонансов является их локализация на центральной оси капли. Причина локализации заключается в искривленности верхней отражающей границы, действующей подобно фокусирующим зеркалам лазерных резонаторов. Развиваемая теория аналогична теории лазерных резонаторов. Полученное выражение для резонансных частот f_n имеет вид

$$f_n = (n + 1/2)v/2h + (v/2\pi h) \arccos(1 - 2h/R), \quad (7)$$

где v - скорость акустических волн в капле, n - номер моды, R - радиус кривизны верхней поверхности капли, h - ее толщина в центре. В отличие от известной формулы для лазерных резонаторов в приведенное уравнение входит множитель $(n + 1/2)$, а не n . Это объясняется тем, что на верхней и нижней границах капли используются разные граничные условия: мягкой границы - наверху и жесткой стенки - внизу. Проведенный анализ показывает, что каплю на подложке можно рассматривать как акустический аналог лазерного резонатора и использовать для описания акустических резонансов в ней известные методы, развитые в оптике. Предложен вариант теории возмущений, позволяющий исследовать различные тонкие эффекты, отличающие каплю от лазерного резонатора.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Экспериментально обнаружен новый эффект образования на капле, лежащей на подложке, квазистационарного солитонообразного выступа при воздействии на нее встречных поверхностных акустических волн. Предложено объяснение этому эффекту на основе анализа пространственного распределения сил акустического радиационного давления встречных волн утечки.
2. Экспериментально обнаружен новый эффект возбуждения автоколебаний на поверхности капли на наклонной подложке при воздействии поверхностных акустических волн, бегущих от нижнего края подложки к верхнему.
3. Предсказан и изучен новый импульсно-колебательный механизм волнового транспорта материальных объектов за счет линейных сил в условиях, когда средняя сила воздействия на объект равна нулю. Отличительной особенностью этого механизма является двунаправленность транспорта, изменяемая только с помощью начальной фазы несущей при сохранении направления распространения волны. Традиционные представления о невозможности транспорта за счет линейных сил являются неполными, поскольку базируются на анализе воздействия гармонических, а не импульсных волн.
4. Теоретически исследована локализация волн Рэлея под следом растекшейся капли и предсказано ее резкое усиление в подложках с анизотропией автоколлимационного типа.
5. Развита теория краевой локализации капиллярных колебаний в капле на подложке. Показано, что в случае несмачиваемой подложки доминирующей причиной краевой локализации является эффект геодезической линзы, а не уменьшение скорости капиллярных волн из-за уменьшения кривизны поверхности на экваторе капли. На основе аналогии с лазерными резонаторами построена теория локализованных толщинных акустических резонансов в капле, лежащей на хорошо смачиваемой поверхности.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Зырянова А.В., Можжаев В.Г.* Анализ перемещения объектов малых размеров импульсами поверхностных акустических волн // Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2004». Секц. физ. Сб. тез. Физ. ф-т МГУ. М.: 2004. С. 35-37.
2. *Зырянова А.В., Можжаев В.Г.* Условия поступательного виброперемещения микрообъектов под воздействием волновых импульсов различной формы // Труды IX Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах», Звенигород. 2004. С. 31-32.
3. *Mozhaev V.G., Zyrianova A.V.* Analysis of bidirectional vibrational transport of small objects by periodic wave trains of pulses // IEEE International UFFC Joint 50th Anniversary Conference. Proceedings. 2004. P. 1169-1172.
4. *Зырянова А.В., Коршак Б.А., Можжаев В.Г.* Микроцунами на капле в поле ультразвуковых рэлеевских волн // Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам "Ломоносов-2005". Секц. Физ. Сб. тез. Физ. ф-т МГУ. М.: 2005. С. 16-18.
5. *Korshak B.A., Mozhaev V.G., Zyrianova A.V.* Profile of liquid droplet agitated by counter-propagating Rayleigh waves: standing-wave soliton or ultrasonic fountain? // In: Innovations in Nonlinear Acoustics: ISNA17 - 17th International Symposium on Nonlinear Acoustics including the International Sonic Boom Forum (State College, USA. 2005). AIP Conference Proceedings. 2006. V. 838. P. 500-503.
6. *Зырянова А.В., Laude V., Можжаев В.Г.* Причины краевой локализации резонансных колебаний несферических капель // В сб.: Форум "Всемирный год физики в Московском университете". Конференция молодых ученых. Сб. материалов. М.: 2005. С. 6-8.
7. *Korshak B.A., Mozhaev V.G., Zyryanova A.V.* Observation and interpretation of SAW-induced regular and chaotic dynamics of droplet shape // IEEE International Ultrasonics Symposium. Proceedings. 2005. P. 1019-1022.
8. *Korshak B.A., Mozhaev V.G., Zyryanova A.V.* Drop microflows and transport induced by surface acoustic waves // In: CISM Advanced Course on Flow and Transport in Microchannels: Fundamental Theoretical Aspects, Experimental Methods, Application (Udine, Italy). Short Lectures. 2005. P. 5.
9. *Зырянова А.В., Коршак Б.А., Можжаев В.Г.* Автоколебания в капле на пьезокристалле при возбуждении бегущих поверхностных акустических волн // В сб.: Сборник трудов XVI сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС. 2005. Т. 1. С. 40-44.
10. *Зырянова А.В., Можжаев В.Г.* Теория краевой локализации собственных колебаний сфероидальной капли // В сб.: Сборник трудов XIX сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС. 2007. Т. 1. С. 277-280.
11. *Зырянова А.В., Можжаев В.Г.* Локализация волн Рэлея в микрожидкостных каналах с квадратичным профилем скорости // Труды XI Всероссийской научной школы-семинара "Волны-2008", «Волновые явления в неоднородных средах», Звенигород. 2008. Ч. 1. С. 37-39.

12. *Berezin M.S., Mozhaev V.G., Zyryanova A.V.* Dielectrophoresis driven by acoustic pulses on piezoelectric substrates // In: 2008 IEEE International Ultrasonics Symposium. Abstract Book. P. 325-326.
13. *Zyryanova A.V., Mozhaev V.G.* Localization of Rayleigh waves in microfluidic channels with square profile // *Phys. Wave Phenom.* 2008. V. 16. N. 4. P. 300-304.
14. *Березин М.С., Зырянова А.В., Можжаев В.Г.* Причины обратного транспорта при диэлектрофорезе в поле бегущих волн // XVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам "Ломоносов-2009". Секц. Физ. Подсекц. Радиофиз. Материалы докладов Физ. ф-т МГУ. М.: 2009. С. 1-2 .
15. *Зырянова А.В., Можжаев В.Г.* Резкое усиление локализации волн Рэлея под следом капли на анизотропных подложках // *Письма в ЖТФ.* 2009. Т. 35. № 10. С. 34-40.
16. *Зырянова А.В., Можжаев В.Г.* Условия поступательного виброперемещения малых объектов под воздействием импульсов различной формы // *ЖТФ.* 2009. Т. 79. № 11. С. 77-85.
17. *Berezin M., Mozhaev V., Zyryanova A.* Dielectrophoresis driven by acoustic pulses on piezoelectric substrates // 9th International Conference on Theoretical and Computational Acoustics. Dresden. Germany. 2009. Book of Abstracts. P. 31.
18. *Kozlov A., Mozhaev V., Zyryanova A.* Waveguide localization in graded crystals with antiguiding acoustic velocity profile // IEEE International Ultrasonics Symposium. Proceedings. 2009. Roma. P. 1161-1164.
19. *Korshak B.A., Mozhaev V.G., Zyryanova A.V.* Video demonstrations of surface-acoustic-wave interaction with drops and related theoretical developments // MicroNanoacoustics Workshop. Prato. Italy. 2009. P. 9.
20. *Kozlov A.V., Mozhaev V.G., Zyryanova A.V.* Waveguide effect under "antiguiding" conditions in graded anisotropic media // *J. Phys. Cond. Matter.* 2010. V. 22. N. 7. P. 075401-075412.
21. *Бегарь А.В., Козлов А.В., Можжаев В.Г.* Толщинные акустические резонансы в капле на подложке // Труды XIV Всероссийской школы-семинара "Физика и применение микроволн" ("Волны-2013"), Можайск. 2013. Секц. 9. С. 4-7.

Подписано к печати 22.05.2013

Тираж 100 экз. Заказ № _8__

Отпечатано во ВНИИГеосистем

Варшавское шоссе 8, Москва, 117105