

На правах рукописи



Пименова Анастасия Владимировна

**ДИНАМИКА НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ТЕКУЧИХ СРЕД С
ДЕФОРМИРУЕМОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ РАЗДЕЛА**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук, профессор Райхер Юрий Львович

Официальные оппоненты:

Жуков Михаил Юрьевич, д.ф.-м.н., проф., заведующий кафедрой вычислительной математики и математической физики, ФГАОУ ВПО Южный федеральный университет

Демин Виталий Анатольевич, д.ф.-м.н., проф., заведующий кафедрой теоретической физики, ФГБОУ ВПО Пермского государственного национального исследовательского университета

Ведущая организация:

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)

Защита состоится «10» ноября 2016 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 004.012.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук по адресу: 614013, Россия, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; тел.: (342) 2478314; факс: (342) 2378487; сайт: www.icmm.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИМСС УрО РАН

Автореферат разослан « » августа 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, д.ф.-м.н, доцент



А.Л. Зуев

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В ряде многофазных систем динамика ключевым образом определяется процессами, протекающими на поверхностях контакта фаз или в ее непосредственной окрестности. Такие системы интересны как с точки зрения математической физики, поскольку их специфика определяет и специфику математического описания, так и своими практическими приложениями.

Одним из примечательных примеров в этом плане является система двух несмешивающихся жидкостей, в которой процесс интенсивного парообразования происходит на поверхности контакта жидкостей и начинается ниже температуры объемного кипения каждой из компонент.¹ Об этом явлении можно говорить как о поверхностном кипении. Эффект понижения температуры кипения широко используется в различных промышленных процессах; в качестве примера можно привести перегонку с водяным паром, позволяющую осуществить дистилляцию веществ, температура кипения которых при атмосферном давлении выше температуры их частичного или полного разложения. Описываемый эффект оказывает значительное влияние на условие воспламенения жидкого топлива: воспламенение смеси керосина с водой требует более низкой температуры, чем воспламенение чистого керосина; в промышленности распространено сжигание водно-мазутных эмульсий, а не чистого мазута; горящее жидкое органическое топливо нельзя тушить водой из-за того, что контакт горящего топлива с водой вызывает интенсивное образование паров обоих веществ. С исследовательской точки зрения, задача о кинетическом описании процесса парообразования в таких системах ниже температур объемного кипения обеих компонент представляет особый интерес, поскольку не сводится к задаче о тепло- и массопереносе и последующем обычном объемном кипении, как в случае, если одна из компонент оказывается в итоге перегретой выше температуры своего объемного кипения. Указанной задаче посвящена первая глава диссертации.

Описание кинетики растущего парового слоя, возникающего между кон-

¹ Жаров В.Т., Серафимов Л.А. Физико-химические основы дистилляции и ректификации. Л.: Химия, 1975.

тактирующими жидкостями, на ранних стадиях, когда система еще не перемешана интенсивно образующимися пузырьками пара, требует исследования гравитационной неустойчивости (неустойчивости Релея–Тейлора) трехслойной стратифицированной системы жидкость–газ–жидкость, где толщина слоя газа существенно меньше толщины слоев жидкостей. Именно вследствие развития гравитационной неустойчивости на верхней границе контакта жидкость–пар происходит срыв парового слоя и формирование пузырька пара, отделяющегося от границы контакта жидкостей.

В связи с рассмотрением естественных неустойчивостей двухслойных систем встает вопрос о возможности искусственного управления свойствами устойчивости состояний таких систем, включая полное подавление неустойчивостей. Именно этот вопрос послужил мотивом экспериментальных работ Вольфа¹ по использованию вибрационного воздействия для подавления неустойчивости Релея–Тейлора. Для случая горизонтальных вибраций Любимовым и Черепановым² был позже установлен новый механизм неустойчивости стратифицированного состояния, однако задача о динамике волн с учетом нелинейности и свойствах их устойчивости в случае малой толщины вязких пограничных слоев оставалась открытой. Исследование динамики структур, образующихся при воздействии горизонтальными вибрациями на систему двух несмешивающихся жидкостей, описанное в третьей главе настоящей работы, интересно в связи с развитием теории управления состояниями многофазных жидкостных систем с помощью высокочастотных вибраций.

Решение задачи о возникновении диссипативных сил при столкновении двух вязкоупругих тел актуально как с точки зрения развития фундаментальной теории контактного взаимодействия, так и для рассмотрения прикладных вопросов динамики гранулированных сред. В теориях, разработанных ранее^{3,4}, учитывались только вязкие напряжения на поверхности контакта, при

¹ Wolf G.H. Dynamic stabilization of the interchange instability of a liquid-gas interface // *Physical Review Letters*. – 1970. – V. 24. – №. 9. – P. 444.

² Любимов Д.В., Черепанов А.А. О возникновении стационарного рельефа на поверхности раздела жидкостей в вибрационном поле // *Изв. АН СССР. МЖГ*. – 1986. – №6. – С. 8–13.

³ Brilliantov N., Spahn F., Hertzsch J., Pöschel T. Model for collisions in granular gases // *Phys. Rev. E*. – 1996. – Vol. 53. – P. 5382–5392.

⁴ Zheng Q.J., Zhou Z.Y., Yu A.B. Contact forces between viscoelastic ellipsoidal particles // *Powder Technology*. – 2013. – Vol. 248. – P. 25–33.

этом аналогичные напряжения и связанные с ними деформации в объеме не принимались во внимание, что приводило к явным несоответствиям с фундаментальными физическими законами.

Цели работы:

- Построение теоретического описания процесса кипения двух несмешивающихся жидкостей ниже температуры объемного кипения каждой из компонент на основе первых принципов.
- Исследование зависимости времени срыва парового слоя, образующегося в процессе кипения на границе раздела двух несмешивающихся жидкостей, от макроскопических характеристик состояния системы.
- Описание развития гравитационной неустойчивости тонкого газового слоя, заключенного между двумя толстыми слоями жидкостей.
- Исследование динамики структур, возникающих на поверхности раздела двух горизонтальных тонких слоев несмешивающихся жидкостей при наличии высокочастотных горизонтальных вибраций.
- Нахождение точного выражения для описания диссипативных сил, возникающих при столкновении двух вязкоупругих тел.

Методология и методы исследования. В ходе диссертационного исследования широко используются аналитические методы, в частности, методы анализа дифференциальных уравнений, методы функционального анализа и математической физики. Для решения поставленных задач используются методы разложения по малому параметру и метод многих масштабов.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней впервые:

- Построена математическая модель процесса кипения системы двух несмешивающихся жидкостей ниже температуры объемного кипения каждой из компонент, основанная на макроскопическом описании процессов переноса в системе.
- Найдена связь кинетики парового слоя в описанной выше системе с макроскопическими характеристиками состояния системы.
- Найдена зависимость параметра $\partial S / \partial V$ (площадь поверхности контакта в единице объема системы), характеризующего степень перемешанности системы, от притока тепла в систему. Анализ учитывает особенности транс-

портных процессов в турбулентном пограничном слое и опирается на предположение о стохастизации слабо неконсервативной механической динамики системы.

- Проведен анализ линейной неустойчивости трехслойной стратифицированной системы жидкость–газ–жидкость; найден спектр инкрементов возмущений.
- Выведено эволюционное уравнение для волн, возникающих в двухслойной системе несмешивающихся жидкостей при воздействии на них горизонтальными высокочастотными вибрациями. Существенным осложнением, не позволяющим строить типовой околопороговый слабо-нелинейный анализ, является консервативность системы и наличие бесконечного числа нейтрально устойчивых степеней свободы.
- Развит подход к вычислению отклика упругой среды на локализованные в окрестности поверхности контакта объемные силы на основе подхода Ландау¹ к решению Задачи Герца.
- Проведен строгий анализ задачи о динамическом контакте вязкоупругих тел в рамках квазистатического приближения и вычисление исправленного выражения для нахождения диссипативной силы при столкновении вязкоупругих тел, которое свободно от противоречий, имевшихся в более ранних теориях других авторов.

Автором представляются к защите:

- Кинетическая теория процесса поверхностного кипения в системе двух несмешивающихся жидкостей ниже температуры объемного кипения обеих компонент [1,2].
- Математические модели динамики макроскопических параметров состояния системы двух несмешивающихся жидкостей при поверхностном кипении ниже температуры объемного кипения обеих компонент [1,2,7,9,14].
- Выражение для скорости развития гравитационной неустойчивости (неустойчивости Релея–Тейлора) для тонкого парового слоя между двумя толстыми слоями жидкости [3,10,11].
- Уравнения, описывающие нелинейную динамику длинных волн на по-

¹ Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Теория упругости. М.: Наука, 1987.

верхности раздела двух бесконечных слоев вязких жидкостей в поле горизонтальных вибраций [4,12,15].

- Аналитический подход к вычислению деформаций в окрестности поверхности контакта двух упругих тел при наличии распределенной объемной силы [5,6,8,13].
- Выражение для диссипативной силы при динамическом контакте вязкоупругих тел выпуклой формы в квазистатическом приближении (скорость столкновения тел мала по сравнению со скоростью звука в них) [5,6,8,13].

Достоверность полученных результатов подтверждается согласием между теоретическими результатами и экспериментальными данными; совпадением теоретических результатов, полученных разными методами и в рамках разных подходов; согласием результатов диссертационных исследований в предельных случаях с известными ранее результатами; внутренняя непротиворечивость результатов.

Личный вклад автора. Постановка задач, результаты исследования и их интерпретация обсуждалась с научным руководителем Ю.Л. Райхером. Выбор теоретических моделей и методов решения осуществлялся совместно с Д.С. Голдобиним. Основная часть аналитических и численных расчетов выполнена автором лично. Подготовка публикаций проводилась совместно с Д.С. Голдобиним.

Публикации. Материалы диссертации изложены в 8 статьях, 6 из которых опубликованы в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК, [1–6], 1 статья опубликована в электронном виде [7], 1 статья опубликована в рецензируемом журнале, индексируемом РИНЦ [8], 2 труда конференций [9–10] и 5 тезисах конференций [11–15].

Апробация работы. Результаты работы докладывались на Пермских гидродинамических чтениях (Пермь, 28–30 ноября 2013), VIII Научно-практическом семинаре «Актуальные проблемы физики конденсированных сред» (Пермь, 8–10 октября 2014), XIX Зимней школе по механике сплошных сред (Пермь, 24–27 февраля 2015), Научной школе «Нелинейные волны – 2016» (Нижний Новгород, 27 февраля – 4 марта 2016), Пермском городском гидродинамическом семинаре им. Г.З. Гершуни и Е.М. Жуховицкого (Пермь, 25 декабря 2014 и 15 апреля 2016), 8th Conf. of the Int. Marangoni Association (Bad Honnef, 12 – 16 июня 2016).

Практическая и теоретическая ценность. Результаты, полученные в первой и второй главах настоящей работы, могут быть востребованы в различных прикладных задачах химической промышленности, а также в связи с изучением процессов горения жидкого топлива. Уравнения, полученные в третьей главе, могут быть использованы для вибрационного управления двухслойной системой двух жидкостей. Результаты четвертой главы имеют фундаментальное значение для развития теории контактного взаимодействия, а также могут оказаться полезными для описания динамики гранулированных систем, как природного, так и искусственного происхождения. Разработанный метод решения задач с объемными силами может в дальнейшем применяться для широкого круга различных задач (в частности, решения задачи о влиянии адгезии при динамическом контакте).

Содержание и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех содержательных глав, к одной из которых имеется 3 приложения, и заключения. Объем диссертации без учета приложений составляет 145 страниц. В работу включено 13 рисунков. Список литературы содержит 113 наименования.

Общее содержание работы

Введение. Во введении к настоящей работе представлен обзор литературы, краткое содержание и общая характеристика работы.

В **первой главе** рассматривается процесс кипения системы двух несмешивающихся жидкостей ниже температуры объемного кипения каждой из компонент. Закипание такой системы происходит при достижении температуры T_* , при которой сумма давлений насыщенных паров каждой из жидкостей равна атмосферному давлению. В процессе испарения частицы с обеих жидкостей переходят в газовое состояние, образуя между слоями жидкостей тонкую паровую прослойку.

На первом этапе, в разделе 1.2, теория строится для жидкостей с близкими материальными параметрами, а их объемы полагаются приблизительно равными (так что, нельзя говорить о включении капель одной из фаз в другую фазу); в этом случае систему можно полагать симметричной относительно перестановки фаз. В разделе 1.3 теория обобщена для случая произвольных жидкостей.

В разделах 1.2.1 и 1.3.1 введена система положений, исходя из которой строится математическая модель описываемого процесса. Полагается, что температура внутри жидкостей неоднородна, что обеспечивает приток тепла к границе контакта. Пар рассматривается как идеальный газ. В процессе испарения масса жидкой фазы теряется, и поверхность движется вглубь жидкой фазы. Поскольку механическая инертность системы пренебрежимо мала по сравнению с тепловой и диффузионной «инертностью», давление в пределах парового слоя можно считать постоянным и равным внешнему атмосферному давлению. Правомерность использования сделанных допущений подробно обсуждается в разделе 1.5. В этих же разделах выводятся эволюционные уравнения, описывающие перераспределения концентраций частиц внутри парового слоя, и граничные условия для них.

В работе приведен оценочный анализ времен срыва парового слоя в двух характерных случаях: когда система хорошо перемешана процессом кипения и когда система находится в состоянии, близком к стратифицированному. В первом случае в паровом слое под действием силы тяжести на жидкость может возникать вязкое течение Пуазейля. На ранних стадиях роста парового слоя, когда его ширина близка к нулю, поток течения Пуазейля оказывается несущественен, но при достижении растущим слоем некоторой достаточно большой толщины происходит срыв массы пара вдоль слоя с формированием пузырька, который всплывает, отделившись от кипящей границы. Таким образом происходит "обнуление" парового слоя, и процесс пузыреобразования начинается сначала. Во втором случае, когда кипение идет сравнительно медленно и система продолжает находиться в стратифицированном состоянии, срыв парового слоя связан с развитием гравитационной неустойчивости Релея–Тейлора на границе контакта легкой жидкости и пара. Оценка времени роста парового слоя до момента срыва производится в соответствии с результатами, полученными в главе 2.

В разделе 1.2.5 рассмотрен процесс остывания системы на стадиях, когда температура ниже температуры объемного кипения каждой из компонент, но кипение смеси все еще продолжается. Показано, что в процессе остывания система проходит три стадии с разными характеристиками.

В разделе 1.4 приведены оценочные вычисления параметров процесса кипения реальных систем на примере системы вода–*n*-гептан и вода–уайт-спирит. Полученные оценки неплохо согласуются с экспериментальными

наблюдениями.

Первая глава имеет три приложения. В приложении А на основании анализа тепловых переходов, происходящих в системе, приведена оценка зависимости параметра перемешанности системы ($\delta S/\delta V$) от внешнего притока тепла.

В приложении В приведено подробное решение уравнения эволюции парового слоя в общем случае. Показано, что это уравнение пропускает решение, обладающее практически линейным профилем зависимости концентрации частиц пара от величины перегрева.

В приложении С вычисляются физические параметры паровой смеси, в частности, концентрацию насыщенных паров и температуру поверхностного кипения системы двух несмешивающихся жидкостей T_* . Также, на основании кинетической теории Чепмана-Энскога, приведена оценка транспортных коэффициентов $D_{12}(T_*)$ и $\eta_{12}(T_*)$. Все искомые параметры оценены для реальной физической системы вода-*n*-гептан. Фотографии этой системы представлены на рис. 1.

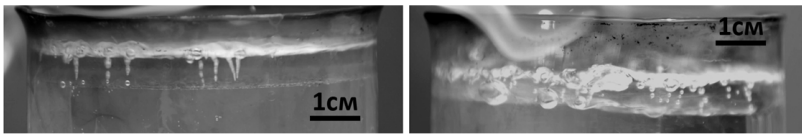


Рис. 1. Процесс кипения на границе вода-*n*-гептан на ранней (слева) и поздней стадии (справа).

Во **второй главе** настоящей работы рассматривается задача о гравитационной неустойчивости (неустойчивости Релея-Тейлора) тонкого горизонтально парового слоя, заключенного между двумя полупространствами, заполненными жидкостями (или толстыми слоями жидкостей), причем легкая жидкость находится сверху. Задача актуальна в связи проблемой поверхностного кипения прямого контакта двух несмешивающихся жидкостей. В этом случае представляет интерес скорость "срыва" парового слоя, растущего на границе контакта жидкостей, который происходит именно в связи с развитием неустойчивости Релея-Тейлора на верхней поверхности раздела жидкость-газ.

Задача решается аналитически в приближении невязких жидкостей и вязкого невесомого пара, что хорошо соответствует параметрам процессов в реальных системах, например, случаю поверхностного кипения системы вода–*n*-гептан.

Для верификации результата рассмотрены предельные случаи бесконечно тонкого и бесконечного толстого слоя пара, для которых результат очевиден из решения классической задачи о неустойчивости Релея–Тейлора. Показано, что эти предельные случаи полностью соответствуют хорошо изученным случаям гравитационно-капиллярных волн на границах раздела жидкость–жидкость и жидкость–газ. Также показано, что система достаточно протяженная в горизонтальном направлении всегда находится в неустойчивом состоянии, волновое число возмущений не ограничено снизу. Найденный спектр показателя коэффициента экспоненциального роста возмущений приведен на рис. 2.

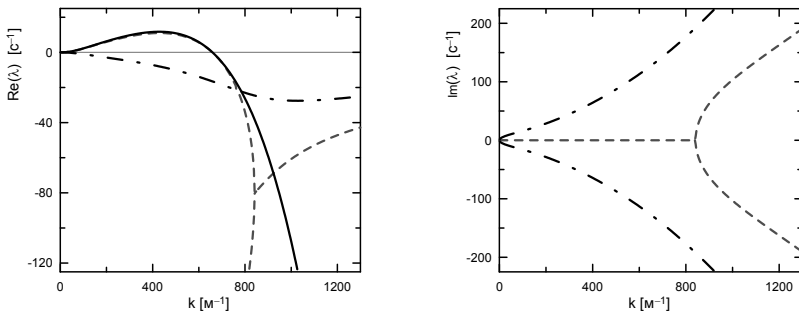


Рис. 2. Спектр инкрементов возмущений λ как функция волнового числа k (представлены вещественная и мнимая часть) для системы вода–*n*-гептан. Сплошной линией представлена аппроксимация для единственной ветви λ , имеющей неотрицательную действительную часть.

Найдена длина волны наиболее быстро растущих возмущений и скорость их роста как функция толщины парового слоя h_0 :

$$\lambda_1(k_{1\max}) = \frac{h_0^3}{54\eta} \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \frac{k_1^4(k_2^2 + k_1^2/3)}{k_{12}^2 + k_1^2/3},$$

где η – динамическая вязкость пара, σ_i – коэффициент поверхностного натяжения i -й жидкости. Полученная зависимость показателя экспоненциального роста возмущений от толщины парового слоя имеет кубический ха-

рактер.

В третьей главе исследуется система, состоящая из двух горизонтальных слоев невязких несмешивающихся жидкостей с плотностями ρ_1 и ρ_2 , ограниченная твердыми горизонтальными стенками и подвергающаяся воздействию высокочастотных горизонтальных вибраций (рис. 3). Скорость вибрационного движения $(b/2)e^{i\omega t} + c.c.$ (здесь “c.c.” означает комплексно сопряженное слагаемое). В качестве малого параметра системы используется величина, обратная безразмерной частоте вибрации, ω^{-1} . Теория строится для случая, когда параметры системы имеют следующие порядки малости по ω^{-1} : отклонение безразмерного вибрационного параметра

$$B = \frac{\rho_* b^2}{\sqrt{\alpha(\rho_2 - \rho_1)}} = B_0 + B_1 \quad (\text{здесь плотности жидкостей обезразмерены преобразованием } \rho_i \rightarrow \rho_* \rho_i, \alpha - \text{коэффициент поверхностного натяжения})$$

от порога неустойчивости $B_1 \sim \omega^{-1}$, характерный продольный размер волн $l \sim \omega^{-1/2}$, осредненное по пульсациям отклонение поверхности раздела от невозмущенного состояния $\eta \sim \omega^{-1}$.

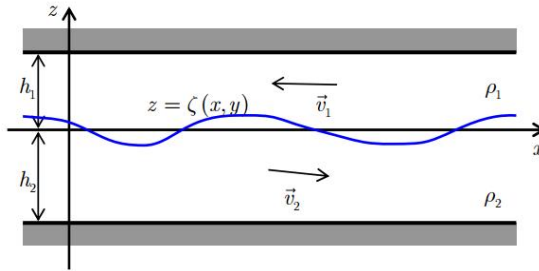


Рис. 3. Схема двухслойной системы в поле горизонтальных вибраций.

В приближении невязких жидкостей из полной системы гидродинамических уравнений при помощи метода многих масштабов выведены уравнения, описывающие осредненную (по вибрационным временам) эволюцию длинноволновых возмущений:

$$\left\{ \begin{array}{l} B_0 \frac{h_1 \rho_2 + h_2 \rho_1}{h_1 h_2} (h_1 \varphi_1)_\tau = \left[1 - \frac{1}{3} \frac{h_1^3 \rho_2 + h_2^3 \rho_1}{h_1 \rho_2 + h_2 \rho_1} \right] \eta_{xx} + \frac{3}{2} \frac{\rho_2 - \rho_1}{h_1 \rho_2 + h_2 \rho_1} \eta^2 + \frac{B_1}{B_0} \eta, \\ \eta_\tau = -(h_1 \varphi_1)_{xx}. \end{array} \right.$$

Здесь нижний индекс обозначает номер жидкости, h_i – толщина слоя соответствующей жидкости, B_0 – порог неустойчивости системы. Интересно заметить, что полученную систему можно свести к одной из форм обобщенного уравнения Буссинеска:

$$\ddot{\eta} - \eta_{xx} + \left(\frac{3}{2} \eta^2 + \eta_{xx} \right)_{xx} = 0.$$

В отличие от классического уравнения Буссинеска, описывающего волны на мелкой воде, полученное уравнение вблизи порога неустойчивости строго описывает динамику волн не только со скоростями, близкими к предельной скорости солитонов $c = 1$, но и для меньших скоростей. Также полученное уравнение применимо для описания взаимодействия встречных волн, тогда как классическое уравнение Буссинеска не справедливо для встречных волн на мелкой воде.

В четвертой главе представлена теория, позволяющая вычислить диссипативные силы, действующие при столкновении двух вязкоупругих тел. Рассматривается случай взаимодействия тел произвольной выпуклой формы с отличающимися материальными параметрами при отсутствующем трении. Динамика системы описывается уравнениями, совпадающими с уравнениями модели Фойгта.

При столкновении двух вязкоупругих тел возникают не только вязкие напряжения на границе контакта, но и объемные вязкие напряжения. В ранее опубликованных работах других авторов, эти объемные напряжения не учитывались, что приводило к несогласованности теории.

Для решения задачи используется подход, реализованный Л. Ландау для решения задачи Герца о контакте упругих тел выпуклой формы. В диссертационном исследовании используется строгий метод разложения по малому параметру. В качестве малого параметра используется отношение времени микроскопической релаксации напряжений к продолжительности процесса столкновения. На первом этапе находится решение в нулевом порядке мало-

сти. Показано, что для поставленной задачи, оно полностью соответствует решению контактной задачи Герца. На втором этапе найдены поправки младшего порядка. Получено выражение для вычисления диссипативных сил, действующих между сталкивающимися телами:

$$F_z^{v(1)} = -\frac{3}{2} A C_0 \sqrt{\xi} \dot{\xi}.$$

Здесь ξ — величина сближения тел по сравнению с недеформированным

состоянием,
$$A = \frac{\gamma_1 D_1 + \gamma_2 D_2}{D_1 + D_2}, \quad D_i = \frac{1 - \nu_i^2}{Y_i},$$

$$\gamma_i = \frac{1}{Y_i} \left(\frac{1 + \nu_i}{1 - \nu_i} \right) \left[\frac{4}{3} \eta_{1(i)} (1 - \nu_i + \nu_i^2) + \eta_{2(i)} (1 - 2\nu_i)^2 \right],$$

индекс $i = 1, 2$ обозначает соответствующее тело, ν_i — коэффициент Пуассона, Y_i — модуль Юнга, η_{1i} — коэффициент сдвиговой вязкости, константа C_0 определяется геометрией сталкивающихся тел и их материальными свойствами и известна из решения задачи Герца: $F_{\text{Hertz}} = C_0 \xi^{3/2}$.

Основные результаты

- На основании макроскопического описания процессов переноса, построена кинетическая теория процесса поверхностного кипения в системе двух несмешивающихся жидкостей ниже температуры объемного кипения обеих компонент. Выведено уравнение эволюции парового слоя в случае, когда материальные параметры жидкостей близки, и в случае жидкостей с произвольными параметрами. Найдено решение этих уравнений, соответствующее растущему паровому слою.
- Проведен анализ задачи о срыве пузырьков пара с растущего парового слоя на ранней стадии, когда система находится в стратифицированном состоянии, и на поздних стадиях кипения, когда система хорошо перемешана поднимающимися пузырьками пара. На основе результатов этого анализа установлено характерное время роста парового слоя до его «обнуления» за счет срывов пузырьков, оценены максимальный и средний перегрев системы при заданной скорости притока тепла в систему.
- Проведен анализ гравитационной неустойчивости для тонкого парового

слоя между двумя толстыми слоями жидкости. Показано, что в случае системы, бесконечно протяженной в горизонтальном направлении, волновое число возмущений не ограничено снизу, и система всегда находится в неустойчивом состоянии. Получен спектр инкремента возмущений. Найдена наиболее опасная мода возмущений.

- Выведено уравнение, описывающее нелинейную динамику длинных волн на поверхности раздела двух бесконечных слоев невязких жидкостей в поле горизонтальных вибраций. Обнаружены нетривиальные особенности динамики солитонов в этой системе: быстрые солитоны устойчивы, а медленные оказываются неустойчивыми. В зависимости от начальных возмущений медленный солитон либо распадается на пару быстрых, либо ведет к взрывному формированию сингулярности.
- Разработан подход к аналитическому вычислению деформаций в окрестности поверхности контакта двух упругих тел при наличии распределенной объемной силы на основании метода возмущений.
- Построено полное самосогласованное описание диссипативной силы, возникающей при контактном взаимодействии двух вязкоупругих тел. В работе учтены вязкие напряжения в объеме, что было упущено в опубликованных ранее работах других авторов.

Список основных публикаций

1. Пименова А.В., Голдобин Д.С. Кипение на границе двух несмешивающихся жидкостей ниже температуры объемного кипения каждой из компонент // ЖЭТФ. 2014. Т. 146, № 1. С. 105–115.
2. Pimenova A.V., Goldobin D.S. Boiling of the interface between two immiscible liquids below the bulk boiling temperatures of both components // *European Physical Journal E*. 2014. Vol. 37. P. 108–17.
3. Пименова А.В., Голдобин Д.С. Гравитационная неустойчивость тонкого слоя газа между двумя толстыми слоями жидкостей // *Выч. Мех. Сплошных Сред*. 2015. Т. 8, № 2, С. 200–207.
4. Goldobin D.S., Pimenova A.V., Kovalevskaya K.V., Lyubimov D.V., Lyubimova T.P. Running interfacial waves in two-layer fluid system subject to longitudinal vibrations // *Physical Review E*. 2015. Vol. 91. P. 053010–10.
5. Brilliantov N.V., Pimenova A.V., Goldobin D.S. A dissipative force between colliding viscoelastic bodies: Rigorous approach // *Europhysics Letters*. 2015. Vol. 109. P. 14005–6.

6. **Goldobin D.S., Susloparov E.A., Pimenova A.V., Brilliantov N.V. Collision of viscoelastic bodies: Rigorous derivation of dissipative force // European Physical Journal E. 2015. Vol. 38. P. 55–9.**
7. Goldobin D.S., Pimenova A.V. Specific interface area and self-stirring in a two-liquid system experiencing intense interfacial boiling below the bulk boiling temperatures of both components // ARXIV. 2016. Eprint arXiv:1606.09520. [Электронный ресурс]. URL: <http://arxiv.org/abs/1606.09520> (Дата обращения: 30.06.2016).
8. Голдобин Д.С., Пименова А.В., Суслопаров Е.А., Бриллиантов Н.В. Диссипативные силы при столкновении вязкоупругих тел // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2016. № 1 (32). С. 33–42.
9. Goldobin D.S., Pimenova A.V. Assessment of the dependence of (dS/dV) on the heat influx for a well-stirred two-phase system with interfacial boiling // Материалы XVII Всероссийского семинара "Моделирование неравновесных систем". Красноярск, Академгородок, 3–5 октября 2014. – Красноярск, 2014. С. 47–51.
10. Pimenova A.V., Goldobin D.S. Gravitational instability of thin vapour layer between two liquid half-spaces // Материалы XVII Всероссийского семинара "Моделирование неравновесных систем". Красноярск, Академгородок, 3–5 октября 2014. – Красноярск, 2014. С. 118–124.
11. Пименова А.В., Голдобин Д.С. Гравитационная неустойчивость тонкого парового слоя, заключенного между двумя слоями жидкостей // XIX Зимняя школа по механике сплошных сред. Пермь, 24–27 февраля 2015. – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2015. С. 241.
12. Голдобин Д.С., Пименова А.В., Ковалевская К.В., Любимов Д.В., Любимова Т.П. Бегущие волны на границе раздела в двухслойной системе невязких жидкостей, подверженной горизонтальным вибрациям // XIX Зимняя школа по механике сплошных сред. Пермь, 24–27 февраля 2015. – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2015. С. 83.
13. Пименова А.В., Голдобин Д.С., Бриллиантов Н.В., Суслопаров Е.А. Диссипативные силы при столкновении двух вязкоупругих тел // XIX Зимняя школа по механике сплошных сред. Пермь, 24–27 февраля 2015. – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2015. С. 242.
14. Goldobin D.S., Pimenova A.V. Self-Stirring of a Two-Liquid System with Vapour Generation on the Liquid-Liquid Interface // IMA8 — 8th Conf. of the Int. Marangoni Association: Book of Abstracts. Bad Honnef, Germany, June 12 – 16, 2016. – Cottbus: Brandenburgische Technische Universität, 2016. P. 32.
15. Goldobin D.S., Pimenova A.V., Lyubimova T.P. Interfacial Waves in Inviscid Two-Layer Liquid System Subject to Longitudinal Vibrations // IMA8 — 8th Conf. of the Int. Marangoni Association: Book of Abstracts. Bad Honnef, Germany, June 12 – 16, 2016. – Cottbus: Brandenburgische Technische Universität, 2016. P. 31.