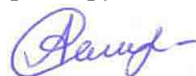


На правах рукописи



Самойлова Анна Евгеньевна

**КОНВЕКТИВНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ
ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СЛОЕВ ЖИДКОСТИ
С ДЕФОРМИРУЕМОЙ ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2015

Работа выполнена на кафедре теоретической физики ФГБОУ ВПО Пермский государственный национальный исследовательский университет

Научный руководитель:

Демин Виталий Анатольевич, доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Гончарова Ольга Николаевна, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры дифференциальных уравнений, ФГБОУ ВПО Алтайский государственный университет

Файзрахманова Ирина Сергеевна, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры общей физики, ФГБОУ ВПО Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет

Защита диссертации состоится “ 10 ” марта 2016 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.012.01 в ФГБУН Институт механики сплошных сред УрО РАН по адресу: 614013, Россия, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; тел: (342) 2378314; факс: (342) 2378487; сайт: www.icmm.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института механики сплошных сред УРО РАН.

Автореферат разослан “ ” 2016 г.

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

А.Л. Зуев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Конвекция, связанная с неоднородным нагревом, является без преувеличения самым распространенным видом течений газа и жидкости в природе. Знание закономерностей устойчивости равновесия и течений подводит нас к возможности управления механизмами кризиса устойчивости. Все это свидетельствует об актуальности изучения конвективной устойчивости, как в теоретическом плане, так и с точки зрения ее практических приложений.

Горизонтальный слой жидкости, помещенный на твердую подложку и ограниченный сверху свободной поверхностью с газовой фазой над ней, является классической системой для изучения конвекции Рэля–Бенара–Марангони. В то же время традиционно используемая модель Буссинеска, применяемая при линейном анализе устойчивости такой системы, оказывается непригодной для исследования деформационных мод неустойчивости¹. Настоящее исследование базируется на использовании нестандартной модели, позволяющей корректно учитывать влияние плавучести на деформационные моды конвективной неустойчивости. Ранее эта модель позволила обнаружить принципиально новые эффекты, связанные с деформацией свободной поверхности. В условиях пониженной гравитации эти эффекты могут приводить к развитию неустойчивостей, которые могут быть нежелательными в различных технологических процессах, протекающих на орбитальной космической станции.

Исследование термокапиллярной конвекции в тонких пленках имеет фундаментальный интерес в связи с тем, что сравнительно недавно были определены условия возникновения нестационарной конвекции Марангони в тонкой пленке при нагреве снизу². Более детальное исследование этого явления, а также расширение границ применимости вышеупомянутого результата позволит глубже понять физические механизмы этой

¹ Андреев В. К., Гапоненко Ю.А, Гончарова О.Н., Пухначев В.В. Современные математические модели конвекции. Москва: Физматлит, 2008. — 368 с.

² Shklyaev S., Khenner M., and Alabuzhev A.A. Oscillatory and monotonic modes of long-wave Marangoni convection in a thin film // Phys. Rev. E. 2010. Vol. 82. P. 025302.

неустойчивости, а также будет способствовать экспериментальной реализации этого теоретического результата.

Исследования, проводившиеся в рамках данной диссертации, были поддержаны грантами Российского фонда фундаментальных исследований (№ 11-01-16048-моб_з_рос, № 12-01-09223-моб_з, № 14-01-00148), Научно-образовательного центра «Неравновесные переходы в сплошных средах» (№ 07-11н-019с, № 08-13н-16с, № 10-16н-08с), программой поддержки Ведущих научных школ (проект № 2.1.1.4463), Фонда поддержки некоммерческих программ «Династия».

Целью работы является теоретическое исследование различных типов неустойчивости слоев жидкости с деформируемой свободной поверхностью (границей раздела сред) при наличии термокапиллярного эффекта. Рассматриваются две ситуации: в первой рассматривается колебательная мода неустойчивости при наличии эффекта плавучести, при этом используется небуссинесковская модель для описания конвекции. Во второй ситуации слой считается настолько тонким, что плотность жидкости не меняется существенно, при этом внимание сосредоточено на поиске колебательной моды термокапиллярной неустойчивости при подогреве снизу.

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

1. Изучено влияние изменения числа Прандтля на колебательную неустойчивость Рэлея–Бенара–Марангони в рамках небуссинесковской модели корректного учета плавучести для слоя со свободной поверхностью.
2. Обнаружена новая мода колебательной неустойчивости слоя жидкости со свободной поверхностью, основным механизмом которой является раскочка капиллярных волн за счет теплового расширения жидкости.
3. Обнаружена новая колебательная мода конвекции Марангони в тонкой пленке жидкости за рамками длинноволнового приближения.
4. Выведены амплитудные уравнения термокапиллярной конвекции, описывающие эволюцию толщины тонкой пленки жидкости и осредненной по высоте температуры жидкости в рамках двухслойного подхода.

5. Проведен линейный и слабонелинейный анализ возникновения трехмерных структур на квадратной решетке в результате возбуждения термокапиллярной неустойчивости тонкой пленки жидкости.

Методы диссертационного исследования. При получении результатов исследований используются как аналитические методы (это различные подходы функционального анализа, теории дифференциальных уравнений и уравнений математической физики), так и численные методы решения однородных и неоднородных краевых задач (метод стрельбы, ортогонализации).

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования. Некоторые из результатов имеют фундаментальное значение и широкий диапазон применения в различных прикладных вопросах. Результаты исследования неустойчивости Рэлея–Бенара–Марангони, возникающей в слое со свободной деформируемой поверхностью, а также анализ новой колебательной моды неустойчивости, связанной с тепловым расширением жидкости, могут быть использованы в технологических процессах и при постановке экспериментов на космической станции в условиях микрогравитации. Результаты вычисления порога возникновения термокапиллярной неустойчивости и картина деформаций тонкой пленки могут быть применены в технологических процессах легирования поверхности металлов.

Автор защищает:

1. Результаты линейного анализа колебательной неустойчивости Рэлея–Бенара–Марангони в плоском слое со свободной деформируемой поверхностью в рамках небуссинесковской модели корректного учета плавучести.
2. Карту режимов, отражающую условия возникновения и устойчивости вторичных возмущений для конвекции Рэлея–Бенара–Марангони в плоском слое со свободной поверхностью.
3. Результаты линейного и асимптотического анализа колебательной моды, возникающей в слое жидкости со свободной деформируемой поверхностью в отсутствие термокапиллярного эффекта и подъемных сил.
4. Карту устойчивости, отражающую условия возникновения монотонной и колебательной конвекции Марангони в подогреваемой снизу тонкой пленке жидкости со свободной деформируемой поверхностью.

руемой поверхностью.

5. Амплитудные уравнения, описывающие термокапиллярную неустойчивость подогреваемой снизу тонкой пленки жидкости с деформируемой границей в рамках двухслойного подхода.

6. Пороги возникновения и карту вторичных режимов термокапиллярной неустойчивости подогреваемой снизу тонкой пленки жидкости с деформируемой границей в рамках двухслойного подхода.

Достоверность результатов подтверждается результатами тестирования используемых программ расчетов; совпадением данных, полученных разными методами и в рамках разных подходов; соответствием численных и аналитических результатов в предельных случаях.

Публикации и личный вклад автора. Основные материалы диссертации изложены в работах [1–23], из них 2 работы опубликованы в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК [15,20]. Работы [1,8–11,13,17–19,21–23] выполнены автором лично, в работах [2–7,12,14–16,20] получение и обработка результатов проведены диссертантом, анализ осуществлен совместно с соавторами.

Апробация работы. Результаты работы были представлены на следующих конференциях: конф. молодых ученых «Неравновесные процессы в сплошных средах», Пермь (2006, 2007); XV Зимняя школа по механике сплошных сред, Пермь, 2007; межвуз. науч.-практ. конф. студ., аспирантов и молодых ученых «Физика для Пермского края», Пермь, 2008; всерос. конф. молодых ученых «Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики» в рамках XV Научной школы «Нелинейные волны», Нижний Новгород, 2010; XVII Зимняя Школа по механике сплошных сред, Пермь, 2011; 4-я всерос. конф. «Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения», Бийск, 2011; IMA6 – 6th Conf. of the International Marangoni Association, Haifa, Israel, 2012; всерос. конф. молодых ученых «Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики» в рамках XVI Научной школы «Нелинейные волны», Нижний Новгород, 2012; XVIII Зимняя Школа по механике сплошных сред, Пермь, 2013; IMA7 – 7th Conf. of the International Marangoni Association, Vienna, Austria, 2014; 2-ая межд. конф.

«Пермские гидродинамические научные чтения», Пермь, 2014; XIX Зимняя Школа по механике сплошных сред, Пермь, 2015; 18-ая межд. конф. «Потоки и структуры в жидкостях», Калининград, 2015; VIII межд. конф. «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике», Новосибирск, 2015. Кроме того, результаты работы докладывались на Пермском гидродинамическом семинаре имени Г.З. Гершуни и Е.М. Жуховицкого (2014, 2015).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, включающего обзор литературы, двух глав, заключения и списка литературы, содержащего 119 наименований. Диссертация содержит 22 рисунка. Общий объем диссертации составляет 120 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** представлен обзор литературы по теме диссертации и дана общая характеристика работы.

В **первой главе** рассматривается колебательная устойчивость плоского слоя жидкости, расположенного на твердой подложке, которая поддерживается при постоянной температуре. Слой ограничен сверху свободной поверхностью, которая может деформироваться. На верхней границе также присутствует термокапиллярный эффект: предполагается линейная зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры $\alpha = \alpha_0 - \alpha_T T$, где α_T – температурный коэффициент поверхностного натяжения. Система находится в поле тяжести, присутствует сила плавучести. В параграфе 1.1 дана постановка задачи, приведены полные гидродинамические уравнения, обсуждается вопрос применимости приближения Буссинеска для слоя со свободной деформируемой границы. В параграфе 1.2 описана альтернативная модель тепловой конвекции, позволяющая корректно учесть влияние плавучести на деформационные моды конвекции Марангони³. В рамках этой модели температурная

³ Lyubimov D.V., Lyubimova T.P., Alexander Iwan J.D. and Lobov N.I. On the Boussinesq approximation for fluid systems with deformable interfaces // Adv. Space Res. 1998. Vol. 22, N 8. P. 1159–1168.

зависимость плотности учитывается во всех слагаемых в гидродинамических уравнениях. Тепловая конвекция в данной модели описывается следующими уравнениями в безразмерной форме:

$$\frac{\rho_0}{Pr} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\nabla p + \Delta \vec{v} + \nabla(\nabla \cdot \vec{v})/3 + \rho_0 Ra T \vec{\gamma},$$

$$\partial T / \partial t = \Delta T + \vec{v} \cdot \vec{\gamma}, \quad \nabla \cdot \vec{v} = \varepsilon \Delta T,$$

которые дополняются уравнением состояния $\rho_0(T)$ в экспоненциальном виде, а также граничными условиями (условие прилипания и постоянства температуры на нижней границе; кинематическое условие, баланс нормальных и касательных напряжений и условие теплоотдачи Био на верхней свободной границе). Итоговая краевая задача характеризуется следующими безразмерными параметрами: число Прандтля $Pr = \nu / \chi$, число Галилея $Ga = gh_0^3 / \nu \chi$, параметр Буссинеска $\varepsilon = \beta \Theta$ число Рэлея $Ra = \varepsilon Ga$, число Марангони $Ma = \alpha_T \Theta h_0 / \eta \chi$, параметр капиллярности $Ca = \alpha_0 h_0 / \eta \chi$ и число Био $Bi = bh_0 / \kappa$. Здесь h_0 – средняя толщина слоя, Θ – характерный перепад температуры в слое, g – ускорение свободного падения; η , ν , β , κ , χ , b – коэффициенты динамической и кинематической вязкости, теплового расширения, тепло- и температуропроводности, теплоотдачи со свободной поверхности, соответственно. В параграфе 1.3 описаны численные методы решения линейной задачи устойчивости Рэлея–Бенара–Марангони: метод стрельбы с использованием процедуры ортогонализации. Основные результаты расчетов представлены в параграфе 1.4 для двух случаев: аномального и нормального теплового расширения (положительных или отрицательных значений ε , соответственно), а также для ситуаций, соответствующих земной гравитации и невесомости (конечным или нулевым значениям числа Галилея). Показано дестабилизирующее влияние при уменьшении числа Прандтля во всем диапазоне рассматриваемых параметров. Обнаружены сложные деформации нейтральных кривых колебательных возмущений в области очень малых значений числа Прандтля. В случае нормального теплового расширения обна-

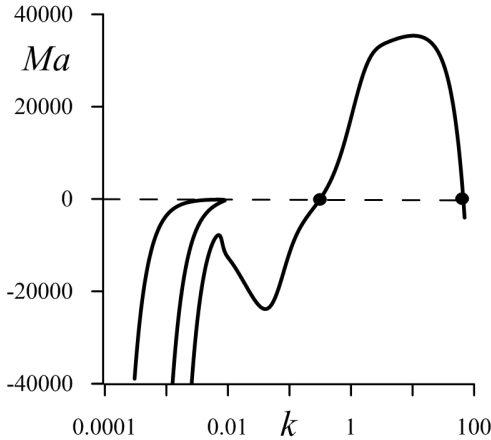


Рис. 1. Нейтральная кривая (зависимость числа Марангони от волнового числа) колебательной неустойчивости при $\varepsilon = -0.1$, $Ca = 5 \cdot 10^5$, $Ga = 0$, $Pr = 10^{-5}$. Жирными точками отмечены точки существования новой моды неустойчивости.

ружен переход нейтральной кривой в область с противоположным знаком термокапиллярного эффекта (смена знака числа Марангони на Рис.1). Выявлено возникновение колебательной неустойчивости в отсутствие термокапиллярного и подъемно-опускного механизмов (жирные точки на Рис.1.).

Слабонелинейный анализ конвекции Рэлея–Бенара–Марангони проведен в параграфе 1.5. Получена система амплитудных уравнений Гинзбурга–Ландау, описывающая эволюцию вторичных возмущений в виде двумерных валов. Вычислены коэффициенты Ландау, построена карта режимов для случая нулевой гравитации в широком диапазоне значений числа Прандтля и параметра Буссинеска. Показано, что вторичное течение в виде бегущих валов возбуждается только жестким образом. Нестационарное вторичное течение в виде стоячих валов в широком диапазоне параметров возбуждается мягким образом и устойчиво.

В параграфе 1.6 исследуется новая колебательная мода, существующая в отсутствие термокапиллярных и архимедовых сил. Исследовано влияние характеристик жидкости, силы тяжести, поверхностного натяжения и теплоотдачи со свободной поверхности на новую колебательную моду неустойчивости плоского слоя жидкости, возникающую в отсутствие термокапиллярных сил и плавучести. Получены типичные нейтральные кривые, карты устойчивости и дисперсионные соотношения. Показано, что сила тяжести стабилизируют равновесие; в то время как по-

верхностное натяжение сужает область существования новой моды неустойчивости. Увеличение значения числа Прандтля и теплоотдачи со свободной границы также повышают порог возникновения данной моды неустойчивости. Проведен асимптотический анализ устойчивости относительно коротковолновых возмущений слоя невязкой жидкости со свободной границей в отсутствие термокапиллярного эффекта и силы тяжести. Определены поправки к инкременту вплоть до третьего порядка. Сопоставление данных результатов с результатами вычислений для произвольной длины волны позволило сделать вывод об основном механизме развития новой колебательной моды неустойчивости. А именно, имеет место невязкий механизм возникновения такой неустойчивости, который связан с температурной зависимостью плотности. К развитию неустойчивости приводит эффект растекания жидкости от более нагретых мест к менее нагретым на деформированной из-за капиллярных волн поверхности.

Вторая глава посвящена изучению конвекции Марангони в подогреваемой снизу тонкой пленке жидкости со свободной деформируемой поверхностью. Система находится в поле тяжести, однако считается, что плотность жидкости практически не меняется по толщине слоя. В параграфе 2.1 рассматривается линейная задача об устойчивости тонкого слоя в области параметров, где ранее в рамках длинноволнового приближения предсказывалось существование колебательной моды конвекции Марангони для случая подогрева снизу (для этого свободная поверхность должна иметь возможность для деформирования, а теплоотдача с неё должна быть очень малой). Построены нейтральные кривые, карты устойчивости и дисперсионные соотношения. Определены границы применимости результатов длинноволнового анализа. В рамках диссертационной работы показано, что область параметров, в которой колебательная мода является наиболее опасной, значительно расширяется. В соответствующем пределе продемонстрировано хорошее согласование результатов настоящей работы с результатами длинноволнового анализа. В параграфе 2.2 эта задача рассматривается в рамках двухслойной модели: решается сопряженная задача о конвекции в тонком слое жидкости и о теплопереносе в газе. В

длинноволновом приближении выводятся амплитудные уравнения в безразмерной форме, описывающие крупномасштабную эволюцию осредненной по вертикали температуры $\Theta(x, y, \tau)$ и толщины пленки $h(x, y, \tau)$:

$$\frac{\partial h}{\partial \tau} = \nabla \cdot \left(\frac{h^3}{3} \nabla P + Ma \frac{h^2}{2} \nabla f \right) \equiv \nabla \cdot \bar{j},$$

$$h \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \nabla \cdot (h \nabla \Theta) - \frac{\kappa}{a+1-h} f + \bar{j} \cdot \nabla f + \nabla \cdot \left(\frac{h^4}{8} \nabla P + \frac{h^3}{6} Ma \nabla f \right),$$

где введены обозначения $f = \Theta - h$, $P = Gah - C\Delta h$. Здесь a – относительная толщина слоев газа и жидкости, Ga и Ma – описанные выше числа Галилея и Марангони. Значение параметра капиллярности Ca считается достаточно большим, а отношение теплопроводностей газа и жидкости κ – малым. Поэтому в амплитудных уравнениях фигурируют перемасштабированные параметр капиллярности $C = \delta^2 Ca$ и отношение теплопроводностей $\kappa = \delta^{-2} \kappa$. Роль малого параметра δ играет отношение толщины слоя жидкости к характерному горизонтальному масштабу конвективного движения. Линейный анализ амплитудных уравнений подтвердил существование аналога новой колебательной моды для случая двухслойной системы, а также позволил обнаружить существенное ограничение на условия обнаружения колебательной моды при нагреве со стороны подложки: слой газа над пленкой должен быть порядка толщины пленки (Рис.2). Для системы «силиконовое масло – воздух» приведены оценки параметров, при которых колебательная неустойчивость может наблюдаться в эксперименте. При рассмотрении 1 мм слоя воздуха над 0.1 мм слоем силиконового масла с кинематической вязкостью 100 сСт, характерный масштаб конвективных структур будет составлять 1 см, а период колебаний – 50 с. Критическое значение числа Марангони будет достигнуто при разности температур в 4К.

Проведен слабонелинейный анализ вышеприведенных уравнений эволюции толщины пленки и осредненной температуры. Для монотонной моды получено амплитудное уравнение Гинз-

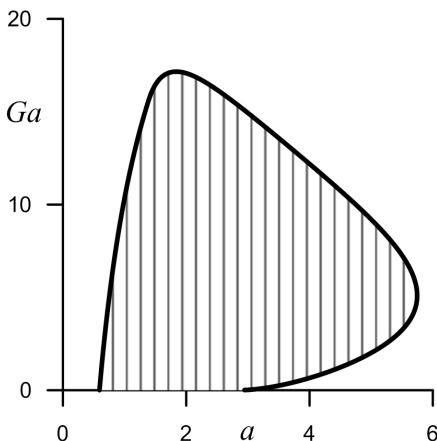


Рис. 2. Карта устойчивости при $\kappa = 0.1$, $Ca = 1000$. Штриховкой обозначена область, в которой опасна длинноволновая колебательная мода в двухслойной системе «жидкость-газ»

бурга-Ландау, описывающее развитие вторичных возмущений в виде валов и квадратов. Построена карта отбора стационарных вторичных структур; показано, что при различных значениях параметров устойчивыми оказываются возмущения в виде двумерных валов или квадратов. Для колебательной моды получены амплитудные уравнения для возмущений на квадратной решетке. Показано, что в узком диапазоне, в котором колебательная мода опасна, устойчивыми являются возмущения в виде бегущих валов.

В заключении представлены основные результаты и выводы диссертации

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Изучена колебательная неустойчивость Релея-Бенара-Марангони в горизонтальном слое жидкости с деформируемой свободной поверхностью в рамках небуссинесковской модели корректного учета плавучести. В случае нормального теплового расширения обнаружен переход нейтральной кривой в область с противоположным знаком термокапиллярного эффекта. Обнаружено существование колебательной неустойчивости в условиях отсутствия термокапиллярного и рэлеевского механизмов.
2. Проведен слабонелинейный анализ задачи о колебательной устойчивости плоского горизонтального слоя жидкости с деформируемой свободной поверхностью. Показано, что вторичное течение в виде бегущих валов возбуждается только жестким

образом. Нестационарное вторичное течение в виде стоячих валов в широком диапазоне параметров возбуждается мягким образом и устойчиво.

3. Исследовано влияние характеристик жидкости, силы тяжести, поверхностного натяжения и теплоотдачи со свободной поверхности на новую колебательную моду неустойчивости плоского слоя жидкости, возникающей в отсутствие термокапиллярных сил и плавучести. Показано, что увеличение значения числа Прандтля и теплоотдачи со свободной границы повышают порог возникновения данной моды неустойчивости. Сила тяжести стабилизирует равновесие, а поверхностное натяжение сужает область неустойчивости.

4. Проведен асимптотический анализ устойчивости относительно коротковолновых возмущений слоя невязкой жидкости со свободной границей в отсутствие термокапиллярного эффекта и сил тяжести. Сделан вывод о том, что механизм возникновения новой колебательной моды неустойчивости – невязкий и связан с температурной зависимостью плотности. К развитию неустойчивости приводит эффект растекания жидкости от более нагретых мест к менее нагретым на деформированной из-за капиллярных волн поверхности.

5. Исследована термокапиллярная неустойчивость подогреваемой снизу тонкой пленки жидкости по отношению к возмущениям с произвольной длиной волны. Подтверждено существование области параметров, в которой колебательная мода является наиболее опасной. Показано, что по сравнению с результатами длинноволнового анализа размер этой области существенно увеличивается. Приведены оценки реальных параметров, при которых колебательная неустойчивость может наблюдаться в эксперименте.

6. Проведен асимптотический анализ термокапиллярная неустойчивости подогреваемой снизу тонкой пленки жидкости в рамках двухслойной модели. В результате длинноволнового разложения получены амплитудные уравнения для эволюции толщины пленки и осредненной температуры пленки. Линейный анализ этих уравнений подтвердил существование аналога новой колебательной моды для случая двухслойной системы. Обнаружено существенное ограничение на условия обнаружения

колебательной моды при нагреве со стороны подложки: слой газа над пленкой должен быть порядка толщины пленки.

7. Проведен слабонелинейный анализ амплитудных уравнений, описывающих эволюцию толщины и температуры пленки в рамках двухслойной модели. Для стационарных вторичных структур показано, что в широком диапазоне параметров устойчивыми оказываются возмущения в виде квадратов. Для колебательной моды показано, что в узком диапазоне, в котором колебательная мода опасна, устойчивыми являются возмущения в виде бегущих валов.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Самойлова А.Е. Колебательная неустойчивость Марангони при малых числах Прандтля // Конф. молодых ученых «Неравновесные процессы в сплошных средах»: тез. докл. Пермь, 2006. С.65–66.
2. Лобов Н.И., Самойлова А.Е. О колебательной неустойчивости плоского слоя с деформируемой границей // 15 Зимняя школа по механике сплошных сред: сб. статей. Пермь, 2007. С. 291–294.
3. Лобов Н.И., Самойлова А.Е. Неустойчивость Марангони в слое жидкости со свободной деформируемой поверхностью в невесомости // Всерос. конф. молодых ученых «Неравновесные процессы в сплошных средах»: мат. конф. Пермь, 2007. С. 274–277.
4. Лобов Н.И., Самойлова А.Е. Колебательная неустойчивость Марангони в слое с деформируемой границей // Гидродинамика. 2007. Вып. 16. С. 149–160.
5. Лобов Н.И., Любимов Д.В., Самойлова А.Е. О колебательной неустойчивости плоского слоя с деформируемой поверхностью в невесомости // Межвуз. науч.-практ. конф. студ., аспирантов и молодых ученых «Физика для Пермского края»: тез. докл. Пермь, 2008. С. 23–24.
6. Лобов Н.И., Самойлова А.Е. Колебательная устойчивость плоского слоя жидкости со свободной деформируемой поверхностью // Конвективные течения. 2009. Вып.4. С. 35–50.

7. Любимов Д.В., Самойлова А.Е. Тепловая раскочка капиллярных волн // Конвективные течения. 2009. Вып.4. С. 29-34.
8. Самойлова А.Е. Слабонелинейный анализ задачи Релея–Бенара–Марангони в слое с деформируемой поверхностью // XV Научная школа «Нелинейные волны», всерос. конф. молодых ученых «Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики»: тез докл. Нижний Новгород, 2010. С. 114.
9. Самойлова А.Е. Слабонелинейный анализ неустойчивости плоского слоя жидкости со свободной деформируемой поверхностью // XVII Зимняя Школа по механике сплошных сред: тез. докл. Пермь, 2011. С. 279.
10. А.Е. Самойлова. О возникновении конвекции в слое жидкости со свободной поверхностью. Слабонелинейный анализ // Вестник Пермского университета. Сер. Физика. 2011. С. 3–8.
11. Самойлова А.Е. Слабонелинейный анализ колебательной неустойчивости плоского слоя с деформируемой поверхностью // 4-я Всерос. конф. «Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения»: тез. докл. Новосибирск, 2011. С.88
12. Samoilova A.E. and Lobov N.I. The buoyancy effect on oscillatory Marangoni instability in liquid layer with a deformable surface // IMA6 – 6th Conf. of the Int. Marangoni Association. Abstr. Haifa, Israel, 2012. P. 44
13. Самойлова А.Е. Неустойчивость Бенара–Марангони в слое жидкости со свободной деформируемой поверхностью // Всерос. конф. молодых ученых «Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики»: тез. докл. Нижний Новгород, 2012. С. 114.
14. Самойлова А.Е., Лобов Н.И. Численный анализ конвекции Марангони в подогреваемом снизу слое жидкости со свободной поверхностью // XVIII Зимняя Школа по механике сплошных сред: тез. докл. Пермь, 2013. С. 302
15. **Samoilova A.E. and Lobov N.I. On the oscillatory Marangoni instability in a thin film heated from below // Phys. Fluids. 2014. Vol. 26. P. 064101.**
16. Lyubimov D. V., Lyubimova T P., Lobov N. I. and Samoilova A. E. Benard-Marangoni instability in a fluid with a deformable free

surface // IMA7 – 7th Conf. of the Int. Marangoni Association. Abstr. Vienna, Austria, 2014. P. 85.

17.Samoilova A. E. and Lobov N. I. Oscillatory Marangoni instability in thin film heated from below // IMA7 – 7th Conf. of the Int. Marangoni Association. Abstr. Vienna, Austria, 2014. P. 111.

18.Самойлова А.Е., Шкляев С.В. Длинноволновая конвекция Марангони в системе «жидкость-газ» с деформируемой границей при подогреве снизу // Пермские гидродинамические научные чтения – 2014: сб. материалов конф. Пермь, 2014. С. 71–72.

19.Самойлова А.Е. Численное и аналитическое исследование конвекции Марангони в тонком слое жидкости, подогреваемом снизу // XIX Зимняя Школа по механике сплошных сред: тезисы докл. Пермь, 2015. С. 278.

20.Samoilova A.E. and Shklyayev S. Oscillatory Marangoni convection in a liquid-gas system heated from below // Eur. Phys. J. Special Topics. 2015. Vol. 224, N 2. P. 241–248.

21.Samoilova A.E. Long-wave Marangoni convection in a two-layer liquid-gas system heated from below //Fluxes and Structures in Fluids. Proceedings of int. conf. Kaliningrad, 2015. P. 208–209.

22.Самойлова А.Е., Лобов Н.И., Любимов Д.В. Колебательная неустойчивость слоя жидкости со свободной деформируемой границей // VIII Междунар. конф. «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике»: тезисы докл. Новосибирск, 2015. С. 155

23.Самойлова А.Е., Шкляев С.В. Конвекция Марангони в тонкой пленке с деформируемой поверхностью // VIII Междунар. конф. «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике»: тезисы докл. Новосибирск, 2015. С. 156

Подписано в печать 24.12.2015. Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ № _____.
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15. Типография Пермского университета.