

На правах рукописи



Никулина Светлана Анатольевна

**ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВИБРАЦИЙ
И ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ
НА КОНВЕКТИВНЫЕ ТЕЧЕНИЯ НЬЮТОНОВСКОЙ
И ПСЕВДОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТЕЙ**

1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ).

Научный руководитель: **Перминов Анатолий Викторович**, доктор физико-математических наук, доцент.

Официальные оппоненты: **Матвиенко Олег Викторович**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры автомобильных дорог ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет» (г. Томск).

Субботин Станислав Валерьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики и технологии ФГБОУ ВО «Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет» (г. Пермь).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Удмуртский государственный университет» (УдГУ), г. Ижевск.

Защита состоится **21 ноября 2024 г.** в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу: 614018, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87; сайт: www.icmm.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « ___ » октября 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, доцент



/ А.Л. Зув

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень её разработанности.

Вибрации являются эффективным средством воздействия на структуру и устойчивость конвективных течений в ньютоновских и неньютоновских, в частности псевдопластических, жидкостях.

Влияние вибраций на движение ньютоновской жидкости в плоской постановке исследовалось большим количеством ученых: Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкий, Д.В. Любимов (Пермская гидродинамическая школа), Б.М. Берковский, В.К. Полевиков (Белоруссия), E.R.G. Eckertf, Walter O Carlson, (ун-т Миннесоты, США) и многими другими. В этих работах решены отдельные задачи в нормальном поле тяжести или невесомости. Чаще всего в качестве управляющих параметров использовались гравитационное и вибрационное числа Грасгофа. Задачами свободной конвекции в замкнутых полостях в отсутствие вибраций занимались Е.Л. Тарунин (ПГУ), G. Roots (Бристольский ун-т), G.K. Batchelor (Кембридж, Великобритания). Эти задачи являются основополагающими при изучении конвективных режимов и их результаты являются эталоном для верификации сходных задач при вибрационном воздействии на систему. Г.Ф. Путин (ПГУ) экспериментально исследовал влияние вибраций на конвективные течения в земных условиях и микрогравитации на орбитальной станции «Мир». В настоящее время вибрационными воздействиями занимаются научные коллективы: Т.П. Любимова (ИМСС УрО РАН, г. Пермь), А.В. Перминов (ПНИПУ), В.Г. Козлов, А.А. Иванова (ПГГПУ), В.А. Демин (ПГНИУ), В.М. Шевцова (Центр микрогравитационных исследований, Брюссельский ун-т). G. Crewdson, M. Larra (ун-т Стратклайда, Великобритания). Научным коллективом под руководством профессора В.Г. Козлова экспериментально изучается влияние вибраций на конвективные течения, в частности, показано, что резкое возрастание теплопередачи происходит при развитии вибрационных вихрей, при этом гравитационная конвекция играет роль стабилизирующего фактора. Профессором В.М. Шевцовой изучалась термовибрационная конвекция ньютоновской жидкости при пониженной гравитации; показано, что значительный перенос тепла обусловлен вибрациями при низкой гравитации, тогда как в отсутствие вибраций он слабее, а при нормальной гравитации пренебрежимо мал.

Изучение влияния на конвективные течения неньютоновских, в частности псевдопластических жидкостей, в замкнутых полостях набирает популярность в настоящее время. В этой области можно отметить ряд работ Г.З. Гершуни, Д.В. Любимова, Т.П. Любимовой, А.В. Перминова, О.В. Матвиенко (ТГАСУ, Томск.), З.П. Шульмана и Б.М. Берковского (Белоруссия), J. D. Dale (ун-т Альберты, Канада), A.F. Emery (ун-т Вашингтона, США) T. Gul, A. Dawar (ун-т Абдул Вали Хан, Пакистан), M.S. Aghighi (ун-т Бу-Али Сина, Иран). Т.П. Любимова и А.В. Перминов численно изучали устойчивость стационарного плоскопараллельного течения псевдопластической жидкости относительно плоских малых нормальных возмущений; обнаружены две моды неустойчивости: гидродинамическая монотонная (существует при всех значениях числа Прандтля) и тепловая колебательная (исчезает при малых значениях числа Прандтля). M.S. Aghighi с соавторами численно исследовал свободную конвекцию неньютоновской жидкости в плоской треугольной полости при различных управляющих параметрах; показано, что нелинейно-вязкие

свойства в такой геометрии значительно влияют на теплопередачу. Коллективом во главе с Т. Gul изучено влияние гравитационных, тепловых, вибрационных и магнитных полей на движение тонкого слоя псевдопластической жидкости Уильямсона со свободной поверхностью по вибрирующей наклонной плоскости, помещённой в магнитное поле; они наблюдали синхронные колебания плёнки с вибрирующим основанием у края и нарастание колебаний на свободной поверхности по мере удаления от него.

Анализ литературы показал, что влияние вибраций на конвективные течения ньютоновских и псевдопластических жидкостей при различной интенсивности гравитационного поля недостаточно полно изучено даже для плоской постановки.

Объектами исследования настоящей диссертации являются ньютоновская и псевдопластическая жидкости, которые можно отнести к более широкому классу обобщенных ньютоновских жидкостей, реологические уравнения для таких сред определяют однозначную связь между тензором вязких напряжений и тензором скоростей сдвига в каждой точке потока.

Цель работы заключается в установлении закономерностей совместного влияния гравитационного и вибрационного воздействий различной интенсивности на движение ньютоновской и псевдопластической жидкостей в замкнутой прямоугольной полости.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи.

1. Анализ и обобщение существующих подходов к описанию ньютоновской и псевдопластической жидкостей и известных физических эффектов, возникающих при вибрационном воздействии на такие жидкости; формирование единой методики изучения ньютоновской и псевдопластической жидкостей при действии вибрации в гравитационном поле и в его отсутствии.
2. Численное моделирование структур осреднённых и пульсационных течений, а также тепловых полей в ньютоновской и псевдопластической жидкостях при различных значениях реологических параметров в замкнутых прямоугольных полостях с различным аспектным соотношением при варьировании интенсивностей гравитационного и вибрационного воздействий.
3. Построение карты осредненных конвективных режимов ньютоновской жидкости на плоскости управляющих параметров: число Грасгофа – вибрационный параметр.
4. Определение закономерностей эволюции стационарных осредненных и периодических колебательных конвективных режимов течений ньютоновской и псевдопластической жидкостей.
5. Определение границ устойчивости стационарных осредненных конвективных течений ньютоновской и псевдопластической жидкостей при варьировании управляющих параметров.

Научная новизна. В работе **впервые** получены следующие результаты:

1. сформулирована нелинейная задача осредненной конвекции ньютоновской и псевдопластической жидкостей в замкнутой полости с различным аспектным соотношением в поле высокочастотных вибраций и показано, что вклад нелинейной вязкости в генерацию осредненной конвекции определяется специальным вибрационным параметром V ;

2. построены карты осредненных конвективных режимов ньютоновской жидкости в замкнутой квадратной полости, совершающей высокочастотные линейно-поляризованные вибрации, на плоскости управляющих параметров число Грасгофа Gr – вибрационный параметр V для различной интенсивности гравитационного и вибрационного воздействий;
3. исследованы структуры конвективных режимов ньютоновских и псевдопластических жидкостей при различных значениях управляющих параметров в прямоугольных полостях с различным аспектным соотношением в поле высокочастотных вибраций для различной интенсивности гравитационного воздействия;
4. определена граница устойчивости осредненного конвективного течения высоковязкой ньютоновской жидкости на плоскости управляющих параметров число Грасгофа Gr – вибрационный параметр V ;
5. определены пороговые значения вибрационного числа Грасгофа и числа Нуссельта, соответствующие смене режимов стационарного конвективного течения, для случая термовибрационной конвекции псевдопластической жидкости в замкнутой прямоугольной полости;
6. обнаружены два типа решений в задаче об осредненной конвекции псевдопластической жидкости в замкнутой полости при воздействии высокочастотных вибрации в условиях микрогравитации.

Теоретическая и практическая значимость. Результаты работы важны с точки зрения фундаментальной механики жидкости, для развития знаний в области гидродинамики тепломассопереноса в нелинейно-вязких жидких средах при воздействии на них высокочастотных вибраций в условиях нормальной, пониженной и микро- гравитации. Применение результатов возможно для исследования нестационарных неизотермических режимов течений в ньютоновских и неньютоновских средах. Кроме того, результаты могут использоваться при моделировании нефтегазовых процессов: условия добычи, хранения и транспортировки нефти и нефтепродуктов. Изучение особенностей течений и тепломассообмена в неньютоновских средах важны для предприятий, обеспечивающих производство, перекачку, транспортировку и смешивание битумных вяжущих материалов для строительства дорожных покрытий. Результаты, описывающие поведение псевдопластической жидкости в вибрационном поле применимы для описания процессов в рамках инженерной реологии: для изучения реологических свойств реальных материалов, использование этих свойств для построения расчетных моделей машин и аппаратов перерабатывающей промышленности и для управления технологическими процессами для нужд пищевой промышленности.

Методология и методы исследования. Основным инструментом для получения результатов диссертации являлся вычислительный эксперимент. При расчете двумерных течений жидкостей применялся метод конечных разностей. Пространственные производные аппроксимированы центральными разностями второго порядка точности, а временные – первого порядка точности. Для решения уравнения движения применен двухполевой метод (завихренность – функция тока). Уравнения движения решались по явной конечно-разностной схеме. Уравнение

Пуассона решалось методом последовательной верхней релаксации. Для расчета применена равномерная не разнесенная сетка с квадратной ячейкой. Выбор сетки основывался на основании сходимости решений при последовательном уменьшении шага сетки. В результате выбрана сетка, которая обеспечивает нахождение надежных результатов при разумном времени счёта. Численный код создавался лично под руководством научного руководителя

Положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель конвекции псевдопластической жидкости в замкнутой полости, которая учитывает нелинейную зависимость вязкости от скорости сдвига, наличие гравитационного поля разной интенсивности, высокочастотных малоамплитудных линейно-поляризованных неакустических вибраций вдоль гравитационного поля и наличие градиента температуры перпендикулярного полю тяжести.

2. Вибрационный параметр в нелинейных задачах термовибрационной конвекции, который является управляющим критерием и позволяет эффективно задавать интенсивность вибрационного воздействия на неоднородно нагретую жидкость на фоне свободной гравитационной конвекции. Для псевдопластических жидкостей вибрационный параметр определяет вклад осредненной вибрационной силы, связанной с нелинейной вязкостью.

3. Карта конвективных режимов течений ньютоновской жидкости и границы их устойчивости на плоскости управляющих параметров число Грасгофа – вибрационный параметр.

4. Два типа решений задачи осредненной конвекции псевдопластической жидкости в поле высокочастотных вибраций: ньютоновская мода, при которой структура и интенсивность течения совпадает с таковыми в ньютоновской жидкости, и неньютоновская мода, характерная только для псевдопластической жидкости и значительно отличающаяся от ньютоновской по интенсивности.

5. Стационарные и колебательные режимы течений псевдопластической жидкости в невесомости и значения управляющих параметров, определяющих границы перехода между ними.

Степень достоверности. Достоверность результатов работы основывается на использовании проверенных методов и совпадении в предельных случаях с результатами других авторов. Для выполнения расчетов использовались известные и хорошо зарекомендовавшие себя в гидродинамических задачах численные методы (метод конечных разностей, двухполевой метод). Показана сходимость численных решений при последовательном уменьшении шага расчетной сетки. В результате для аппроксимации уравнений была выбрана оптимальная пространственная сетка.

Апробация результатов. Результаты диссертационной работы обсуждались на 12 конференциях: XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Уфа, 2019; XXVIII Всероссийская школа-конференция «Математическое моделирование в естественных науках», Пермь, 2019; VI-я Всероссийская конференция «Пермские гидродинамические научные чтения», Пермь, 2019; XXIX Всероссийская школа-конференция «Математическое моделирование в естественных науках», Пермь, 2020; Международная конференция Пермские гидродинамические научные чтения, Пермь, 2020; Международная

конференция XXII Зимняя школа по механике сплошных сред, Пермь, 2021; International Symposium NON-EQUILIBRIUM PROCESSES IN CONTINUOUS MEDIA PROGRAM AND BOOK OF ABSTRACTS Perm, 2021; XXX Всероссийская школа-конференция «Математическое моделирование в естественных науках», Пермь, 2021; VIII-я Всероссийская конференция «Пермские гидродинамические научные чтения», Пермь, 2022; XIII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Санкт-Петербург, 2023; XXIII Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, Дивноморское, Краснодарский край, 2023; IX-я Всероссийская конференция «Пермские гидродинамические научные чтения» Пермь, 2023.

Публикации. Результаты диссертационного исследования представлены и опубликованы в 17 печатных работах – из них 1 статья в Российском журнале, входящем в перечень ВАК; 3 статьи – в международных системах цитирования Web of Science и SCOPUS и 13 тезисов докладов на конференциях.

Личный вклад автора. Литературный обзор выполнен автором самостоятельно и изложен в первой главе. Формулировки математических моделей, представленные во второй главе диссертации, выполнены автором совместно с научным руководителем. Постановка задач и обсуждение результатов исследований, представленные в третьей, четвертой и пятой главах диссертационной работы, выполнялись совместно с научным руководителем. Результаты, описанные в этих главах, получены автором лично и опубликованы в [1 – 4].

Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите. Диссертационная работа соответствует специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы» по следующим областям исследования, указанным в паспорте специальности: п. 2 «Реологические законы поведения текучих однородных и многофазных сред при механических и других воздействиях», п. 4 «Ламинарные и турбулентные течения», п. 14 «Гидродинамическая устойчивость», п. 16 «Тепломассоперенос в газах и жидкостях».

Структура и объём работы. Текст диссертационной работы состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитированной литературы, включающего 111 наименований. Общий объём диссертационной работы 163 страницы, включая 49 рисунков и 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ отражает актуальность диссертационной работы, ее новизну, теоретическую и практическую значимость. Определены цель и поставлены задачи. Обоснована достоверность полученных результатов.

В ГЛАВЕ 1 выполнен обзор литературы и оценено современное состояние проблемы конвективных течений обобщённой ньютоновской жидкости в поле высокочастотных вибраций. Из приведенного выше обзора литературных источников следует, что вопросы влияния вибраций на структуру течений, режимы переноса тепловой энергии и границы реализации режимов в нелинейно-вязких средах остаются недостаточно изученными.

ГЛАВА 2. В параграфе 2.1 дано определение и классификация обобщенных ньютоновских жидкостей, приведены их примеры. Тензор вязких напряжений для псевдопластической жидкости в рамках реологической модели Уильямсона имеет вид

$$\bar{\tau}_{ij} = \left(\frac{A}{B + \sqrt{I_2}} + \mu_\infty \right) e_{ij}, \quad e_{ij} = \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad I_2 = \frac{1}{2} e_{ij} e_{ji}, \quad (1)$$

где A, B – реологические параметры модели Уильямсона, I_2 – второй инвариант тензора скорости сдвига, μ_∞ – динамическая вязкость при бесконечно больших скоростях сдвига. В предельном случае, когда $A = 0$ реологическая модель Уильямсона трансформируется в реологическую модель для ньютоновской жидкости. В случае конечных A и $B \rightarrow 0$ ($A \gg B$) модель Уильямсона описывает вязкопластические среды.

В параграфе 2.2 сформулирована полная нелинейная задача осредненной конвекции обобщенной ньютоновской жидкости в замкнутой полости в поле высокочастотных вибраций. В диссертационной работе рассматривается замкнутая прямоугольная полость (рис. 1) с различным аспектным соотношением δ ($\delta = h_z/h_x$), целиком заполненная жидкостью (ньютоновской или псевдопластической). Границы полости полагаются идеально теплопроводными. Единичный вектор $\vec{\gamma}$ направлен против силы тяжести. Полость совершает линейно-поляризованные высокочастотные вибрации вдоль оси z , направление вибраций задано вектором \vec{n} . Все границы считаются твердыми и непроницаемыми, выполняется условие полного прилипания. На вертикальных границах полости заданы постоянные разные температуры $\pm\Theta$, на горизонтальных границах полости температура меняется по линейному закону $T = \Theta x/h$. Вибрации считаются высокочастотными, малоамплитудными и неакустическими:

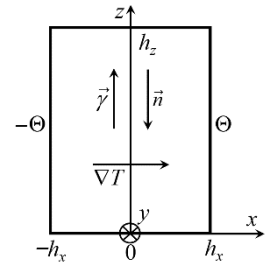


Рис. 1. Геометрия задачи

$$\omega \gg \left\{ \frac{\mu_0}{\rho h^2}, \frac{\chi}{h^2} \right\}, \quad h \gg a\beta\Theta, \quad \lambda = \frac{2\pi c}{\omega} \gg h, \quad (2)$$

где h – характерный размер полости, ω – циклическая частота вибрации, $\mu_0 = (A/B + \mu_\infty)$ – эффективная динамическая вязкость при бесконечно малом сдвиге, λ – длина звуковой волны, соответствующая частоте вибраций, c – скорость звука, a – амплитуда смещения. Выполнение условия неакустических вибраций позволяет считать жидкость несжимаемой, т.е. $\text{div} \vec{u} = 0$.

В параграфе 2.3 написаны размерные уравнения термовибрационной конвекции для псевдопластической жидкости, находящиеся в замкнутой прямоугольной полости в поле тяжести, к которым применен метод осреднения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u}\nabla)\vec{u} &= -\frac{1}{\rho}\nabla p + \frac{1}{\rho}\text{div} \bar{\tau} + g\beta T\vec{\gamma} + \frac{1}{2}(a\omega\beta)^2 \vec{w}\nabla(T\vec{n} - \vec{w}), \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u}\nabla T &= \chi\Delta T, \quad \text{div} \vec{u} = 0, \quad \text{div} \vec{w} = 0, \quad \text{rot} \vec{w} = \nabla T \times \vec{n}. \end{aligned} \quad (3)$$

При выводе системы (3) все физические поля разделены на быстро меняющиеся пульсационные и медленные осредненные, что позволяет пренебречь нелинейными слагаемыми в уравнениях для пульсационных компонент; здесь \vec{u} , T , p – функции медленного времени t , описывающие осредненное конвективное течение, безразмерная амплитуда пульсационного поля скорости представлялась в виде $\vec{u} = \beta \vec{w}$. Вид вязкого слагаемого $\text{div} \vec{\tau}$ определяется реологической моделью.

В параграфе 2.4 получен осредненный вид тензора вязких напряжений:

$$\tau_{ij} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[\left(\frac{A}{B + \sqrt{I_2}} + \mu_\infty \right) e_{0ij} \right] dt_-, \quad I_2 = \frac{1}{2} e_{0ij} e_{0ji}, \quad e_{0ij} = a\omega\beta e_{wij} \sin t_- + e_{uij}. \quad (4)$$

Тензор скорости сдвига разделился на две части: первая – $e_{wij} = (\partial w_i / \partial x_j + \partial w_j / \partial x_i)$ определяется амплитудой скорости пульсаций, вторая – $e_{uij} = (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i)$ скоростью осредненного конвективного течения. Пульсационное течение жидкости считаем невязким.

В параграфе 2.5 написаны уравнения движения в безразмерной форме. При обезразмеривании уравнений (3) и (4) в качестве масштабов выбраны: характерный размер полости h – для пространственных координат, $g\beta\Theta h^2\rho/\mu_\infty$ – скорости осредненного течения, $h^2\rho/\mu_\infty$ – времени, Θ – температуры и амплитуды пульсационной скорости, $g\beta\Theta h\rho$ – давления.

Уравнения переноса (3) и тензор вязких напряжений (4) в безразмерной форме принимают вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \text{Gr}(\vec{u}\nabla)\vec{u} &= -\nabla p + \text{div} \vec{\tau} + T\vec{\gamma} + \frac{1}{2} V^2 \text{Gr}(\vec{w}\nabla)(T\vec{n} - \vec{w}), \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \text{Gr}(\vec{u}\nabla)T &= \frac{1}{\text{Pr}} \Delta T, \quad \text{div} \vec{u} = 0, \quad \text{div} \vec{w} = 0, \quad \text{rot} \vec{w} = \nabla T \times \vec{n}, \\ \tau_{ij} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[\left(\frac{\nu}{1 + \nu B h \sqrt{I_2}} + 1 \right) e_{0ij} \right] dt_-, \quad I_2 = \frac{1}{2} e_{0ij} e_{0ji}, \\ e_{0ij} &= V e_{wij} \sin t_- + e_{uij}, \quad e_{wij} = \left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right), \quad e_{uij} = \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Безразмерные параметры задачи: число Прандтля $\text{Pr} = \mu_\infty / \rho\chi$, реологический параметр $\text{Vh} = \rho g\beta\Theta h / A$, параметр неньютоновости $\nu = A / B\mu_\infty$, число Грасгофа $\text{Gr} = g\beta\Theta h^3\rho^2 / \mu_\infty^2$, вибрационный параметр $V = \alpha a\omega^2 / g$, $(\alpha = \mu_\infty / (\omega\rho h^2) \ll 1)$.

Параметры Vh и ν , характеризуют нелинейную вязкость жидкости.

В параграфе 2.6 обоснована роль вибрационного параметра V , и его значение для определенного класса задач термовибрационной конвекции. Вибрационный параметр характеризует интенсивность вибрационного воздействия на жидкость и не зависит от конвективного параметра $\beta\Theta$, связанного с градиентом температуры. Параметр V , входящий в качестве управляющего параметра в осредненную часть тензора

скоростей сдвига (5), позволяет отделить влияние вибрационного механизма генерации конвекции от теплового. При описании осредненной конвекции нелинейно-вязкой жидкости в гравитационном поле, параметр V дополнительно характеризует влияние неньютоновских свойств на движение жидкости в вибрационном поле. Например, при пониженной гравитации, когда $V \gg 1$, нелинейно-вязкие свойства оказывают существенное влияние на конвективные течения. В невесомости ($g \rightarrow 0$) $V \rightarrow \infty$ целесообразно применение вибрационного числа Грасгофа Gr .

В параграфе 2.7 проанализированы математические модели решаемых в рамках диссертационной работы задач, записаны уравнения движения в терминах завихренности, функции тока осредненного и пульсационного течений, а также граничные условия. **Параграф 2.7.1** посвящён квадратной полости, заполненной псевдопластической жидкостью и находящейся в условиях микрогравитации, **параграф 2.7.2** – прямоугольной полости с псевдопластической жидкостью в невесомости, **параграф 2.7.3** – квадратной полости с ньютоновской жидкостью при различной величине гравитационного поля.

В параграфе 2.8 написаны начальные (однородные) и граничные условия. **В параграфе 2.9** произведены числовые оценки (для нефти) параметров задачи: ω , V . **В параграфе 2.10** описана численная реализация и верификация модели. Показана сходимість решений при последовательном уменьшении шага расчетной сетки для ньютоновской и псевдопластической жидкостей.

ГЛАВА 3 В третьей главе исследовано влияние высокочастотных вибраций на конвекцию ньютоновской жидкости в квадратной полости, которая совершает линейно-поляризованные высокочастотные вибрации в направлении гравитационного поля. **В параграфе 3.1** дана постановка задачи – задача характеризуется тремя безразмерными параметрами: Gr , V , $Pr = 100$. В данной задаче $0 < V \leq 10^4$: В земных условиях $V \leq 1$; в случае высоковязких жидкостей, малых размеров полости ($h \leq 1$ см) и очень высоких частот вибраций $V > 1$; при пониженной силе тяжести $V \gg 1$. Интенсивность гравитационной конвекции характеризовалась числом Грасгофа Gr . Горизонтальный тепловой поток, рассчитанный на единицу длины вдоль вертикальной стенки $x = -1$, характеризовался числом Нуссельта
$$Nu = 0.5 \int_0^2 (\partial T / \partial x) dz .$$

В параграфе 3.2 описаны результаты расчетов. В диапазоне $0 \leq V \leq 10$ основным механизмом генерации осредненного стационарного конвективного течения является сила Архимеда, а в диапазоне $10 \leq V \leq 10^4$ структуру и устойчивость течения определяют вибрации. При горизонтальном градиенте температуры и вертикальных вибрациях состояние квазиравновесия в полости невозможно. В зависимости от значений Gr и V структура и характер течения могут быть различными. Карта конвективных режимов на плоскости параметров $Gr - V$ показана на рис. 2. Область I – 1-о вихревое стационарное конвективное течение, основным механизмом генерации такого течения является подъемная сила Архимеда. В области параметров III реализуется колебательное течение гравитационного типа. Кривая I соответствует переходу от области стационарного режима I к области колебательного режима III. В области II наблюдается 3-х вихревое стационарное течение. В IV стационарное

течение теряет свою устойчивость и наблюдаются колебания теплового (релеевского) типа, вызванные вибрационным воздействием и обусловленные колебаниями поля температуры. В области параметров V (рис. 1б) реализуется 4-х вихревое стационарное термовибрационное конвективное течение. Границы, соответствующие потере устойчивости стационарного течения, изображены линиями 1 и 3 (рис.2), которые пересекаются в точке $V = 0.0075$.

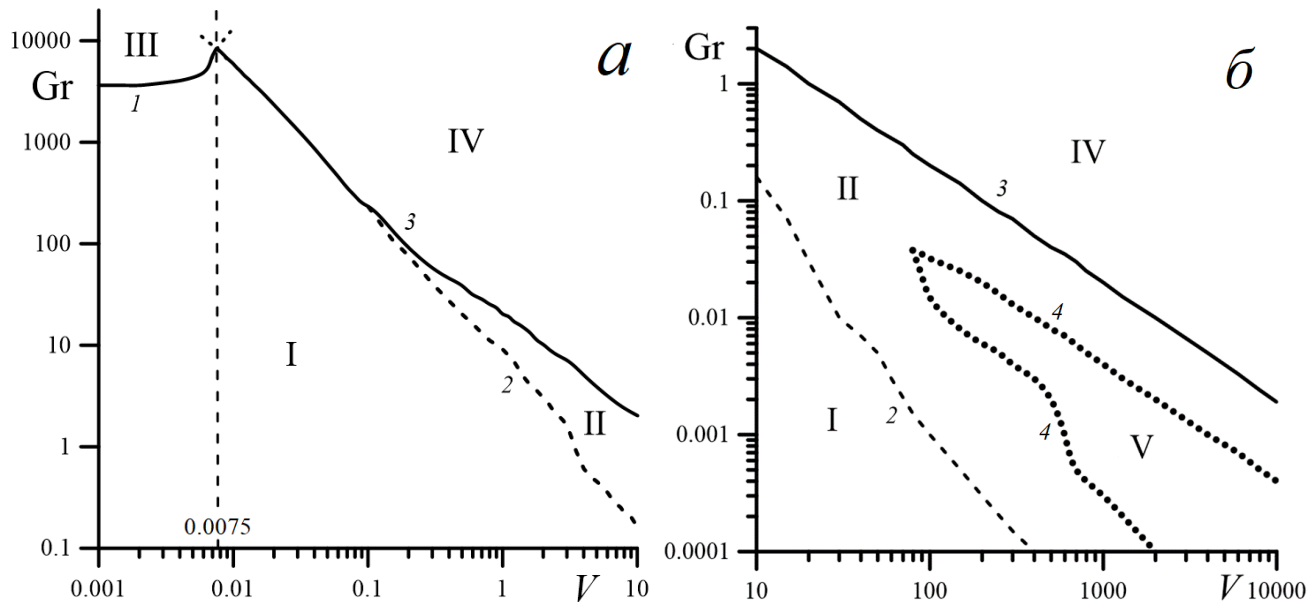


Рис.2 Области существования различных режимов конвекции и их границы: I – 1-о вихревой стационарный; II – 3-х вихревой стационарный; III – колебательный, обусловленный гравитационной модой IV – колебательный, обусловленный вибрационной модой; V – четырехвихревой термовибрационный стационарный.

В параграфе 3.2.1 подробно описаны механизмы переходов между режимами при значениях $V < 0.1$, когда преобладает тегоравитационный механизм генерации конвекции. Построены структуры стационарного течения, реализующегося в области I. Для $V < 0.0075$ неустойчивость стационарного течения определяется гравитационным механизмом (рис.3). Расчеты показали стабилизацию стационарного течения относительно гравитационных возмущений при увеличении V .

Для $V > 0.0075$ потеря устойчивости определяется тепловыми возмущениями, которые распространяются вдоль вертикальных пограничных слоев (рис.4), причем при $0.0075 < V \leq 0.1$ в полости возможна реализация тепловых возмущений двух типов: симметричных относительно поворота полости на 180° и несимметричных. С увеличением вибрационного параметра устойчивость осредненной конвекции жидкости понижается. Пересечению 1 и 3 соответствует $Gr = 8300$, незначительное превышение которого приводит к возникновению квазипериодических колебаний.

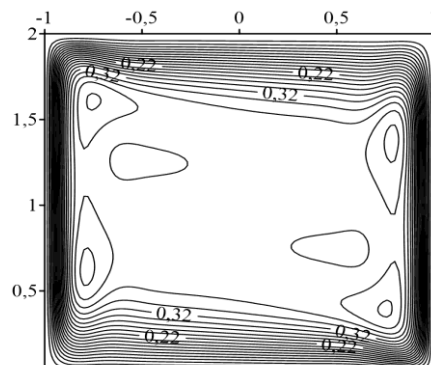


Рис. 3. Изолинии функции тока колебательного течения в случае гравитационного механизма неустойчивости $V = 0.004$ и $Gr = 4200$

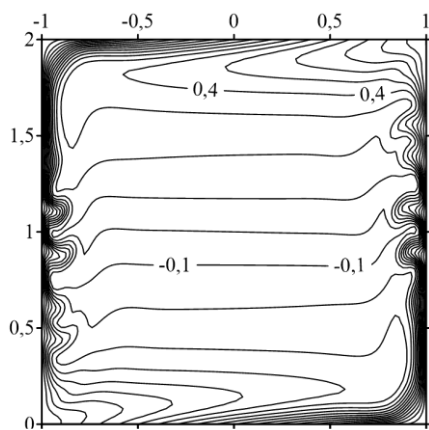


Рис. 4 Поле температуры колебательного течения при тепловом механизме неустойчивости $V = 0.013$ и $Gr = 4200$

В параграфе 3.2.2 описаны конвективные режимы при $V > 0.1$. При таких V роль вибрационного механизма генерации течений становится существенной. Появляется область 3-х вихревого вибрационно-конвективного стационарного течения, обусловленного двумя механизмами (силами): гравитационным и термовибрационным. 3-х вихревое стационарное течение, с увеличением Gr становится неустойчивым. При колебательных режимах для $V > 0.1$ тепловые пограничные слои распространяются на всю полость. Возможна реализация симметричного и несимметричного колебательных режимов. **В параграфе 3.2.3.** описаны конвективные режимы термовибрационной конвекции и их эволюция в условиях пониженной гравитации $10 \leq V \leq 10^4$. Для

таких V вибрации основной механизм генерации течения, они определяют его структуру и устойчивость. При значениях $V > 80$ внутри области 3-х вихревого конвективного течения появляется область, где реализуется 4-х вихревое течение (область V на рис. 2б). При $V \geq 400$ реализуются 3-х или 4-х вихревые стационарные течения. При $V > 2000$ с ростом Gr реализуются сначала 4-х вихревое, затем 3-х вихревое стационарное течение, которое теряет устойчивость и развиваются колебания. Повышение числа Gr всегда приводит к потере устойчивости стационарной конвекции и возникновению колебательных режимов.

Для значений $V = 30, 200, 1000, 3000$ построены зависимости средних за период колебаний значений максимума функции тока $\bar{\psi}_m$ и числа Нуссельта \bar{Nu} от Gr . Для стационарных конвективных режимов ψ_m и Nu имеют определенные значения, не изменяющиеся с течением времени, для колебательных режимов конвекции в надкритической области значения ψ_m и Nu изменяются с течением времени. Переходу к колебательным режимам на зависимостях $\psi_m = f(Gr)$ и $Nu = f(Gr)$ соответствуют характерные изломы. Расчеты, в исследованной области значений вибрационного параметра, не показали разделения колебательных режимов на симметричную и несимметричную моды.

В ГЛАВЕ 4 исследованы конвективные режимы псевдопластической жидкости в квадратной полости с твердыми идеально теплопроводными границами в условиях микрогравитации. **В параграфе 4.1** приведена постановка задачи. Задача характеризуется пятью безразмерными параметрами: Gr, V, Pr, Vh и ν . Реологический параметр $Vh = Pr Gr / \sigma$ ($\sigma = h^2 A / \mu_\infty \chi$ – безразмерный динамический предел текучести) как и число Грасгофа Gr , характеризует конкуренцию гравитационного механизма генерации конвекции и диссипативного механизма, в данном случае связанного с нелинейной вязкостью жидкости. **В параграфе 4.2** описаны основные результаты численных расчетов, которые были выполнены для $\sigma = 62.5; Pr = 10; V = 100; \nu = 25, 100$ и 500 . В результате расчетов в исследованном диапазоне Gr обнаружено существование двух типов решений задачи с различными

конвективными структурами: ньютоновская и неньютоновская моды. Ньютоновская мода реализуется в ньютоновской жидкости ($\nu = 0, A = 0$). Для этой моды осредненное стационарное течение с ростом Gr теряет устойчивость. Неньютоновская мода существует только для псевдопластической жидкости, перехода к не стационарным режимам конвекции не наблюдается. На рис. 4 представлены зависимости числа Нуссельта Nu (а) и максимума функции тока ψ_{max} (б) от числа Грасгофа Gr для псевдопластических жидкостей с параметрами неньютоновости $\nu = 0, 25, 100$ и 500 .

Для ньютоновской моды расчетные точки (рис. 4) для всех трех значений ν очень близки и ложатся вдоль штриховой линии 1. Сплошная линия 2 на врезке соответствует ньютоновской жидкости ($\nu = 0$). Видно, что линии 1 и 2 фактически совпадают – интенсивность течения для псевдопластической жидкости в широком диапазоне Gr не зависит от ν . На ньютоновской моде (рис.4. линия 1) переход от стационарного режима к колебательному происходит в пределах плоского горизонтального участка, здесь увеличение Gr не приводит к увеличению интенсивности течения, так как тепловая энергия переходит в энергию колебаний. Переход к колебательному режиму для всех ν не сопровождается изменением структуры течения, а только лишь пульсацией вихрей.

На неньютоновской моде (линии семейства 3 на рис. 4) расчетные точки для разных ν ложатся вдоль различных кривых. С увеличением Gr интенсивность течения растет, а его структура меняется.

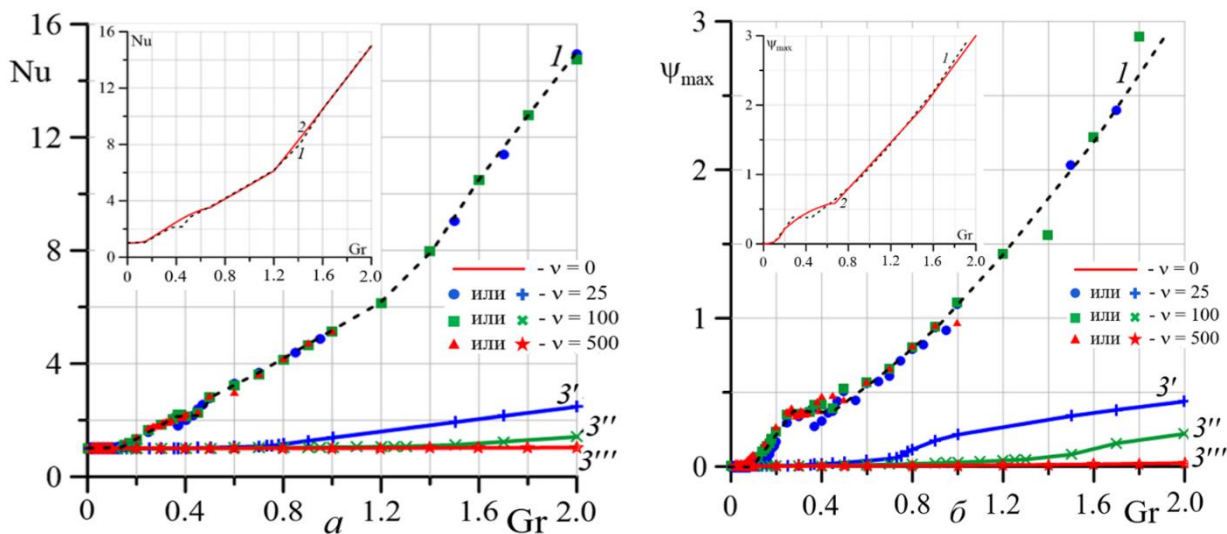


Рис. 4 Зависимости числа Нуссельта Nu (а) и максимума функции тока ψ_{max} (б) от числа Грасгофа Gr : 1 – псевдопластическая жидкость, ньютоновская мода; 2 – ньютоновская жидкость, $\nu = 0$; 3', 3'', 3''' – псевдопластическая жидкость, неньютоновская мода

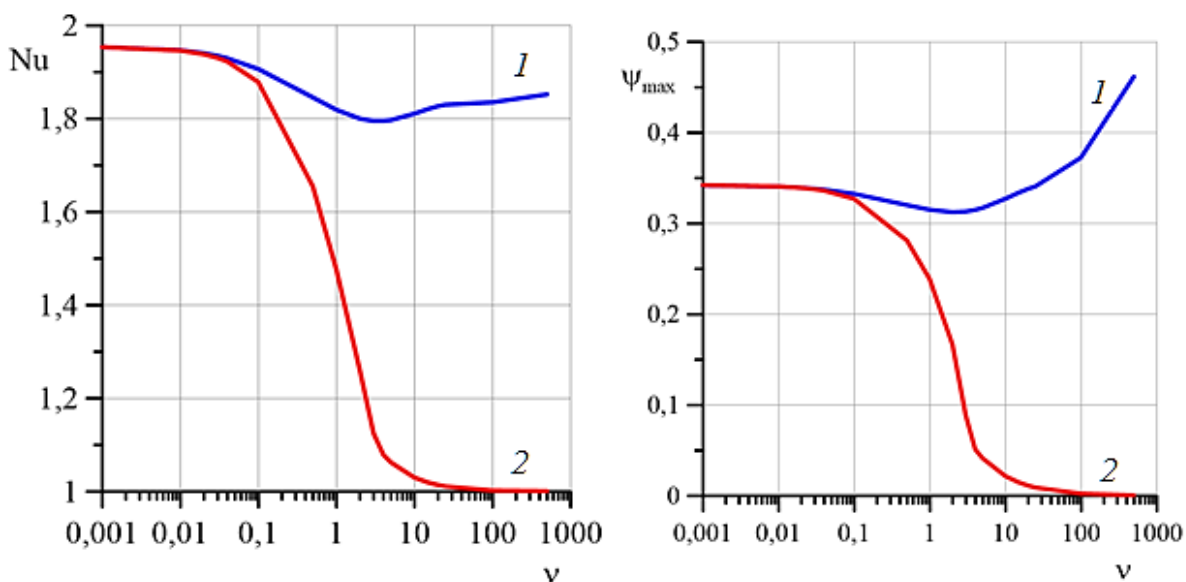


Рис. 5 Зависимости числа Нуссельта Nu (а) и максимума функции тока осредненного течения ψ_{\max} (б) от параметра неньютоновости ν для ньютоновской (1) и неньютоновской моды (2) при $Gr = 0.3$ и $V=100$

На рис. 5 представлены зависимости $Nu = f(\nu)$ и $\psi_{\max} = f(\nu)$ для ньютоновской и неньютоновской мод при $V = 100$ и $Gr = 0.3$. Видно, что при $\nu \rightarrow 0$ (ньютоновский предел реологической модели Уильямсона) кривые, соответствующие ньютоновской и неньютоновской моде совпадают ($\nu \leq 0,05$). При переходе к вязкопластическому пределу $\nu \rightarrow \infty$ эффективная вязкость жидкости линейно зависит от скорости сдвига, неньютоновская мода фактически исчезает.

В параграфе 4.2.1 описаны конвективные структуры ньютоновской моды для параметров неньютоновости $\nu = 25$ и 100 . При малых значениях Gr в полости реализуется медленное 1-но вихревое стационарное конвективное течение, при этом $Nu \approx 1$ (рис. 4а), что характерно для ползущего конвективного течения, где преобладает теплопроводный механизм переноса тепла через полость. Изолинии поля температуры параллельны вертикальным стенкам полости. С увеличением Gr осредненный вихрь наклоняется и вытягивается вдоль диагонали полости, в углах полости появляются два дополнительных вихря малой интенсивности, течение трансформируется в 3-х вихревое. Дальнейшее увеличение Gr приводит к усилению интенсивности угловых вихрей и сильной деформации центрального вихря в осредненном стационарном течении – центр основного вихря разделяется на два, которые удаляются друг от друга. При дальнейшем увеличении Gr в полости реализуется 4-х вихревое конвективное течение, которое характерно для термовибрационной конвекции в невесомости, что свидетельствует об интенсификации конвективного течения и возникновении существенного конвективного переноса тепла через полость. При дальнейшем увеличении Gr течение вновь трансформируется в трехвихревое, при этом изотермы заметно искривляются что свидетельствует о преобладании конвективного механизма переноса тепла.

Для $\nu = 500$ существует два диапазона чисел Gr , где реализуется 3-х вихревая структура осредненного конвективного течения. В первом диапазоне $0.002 < Gr \leq 0.05$ трехвихревое течение по мере увеличения Gr сначала трансформируется в структуру похожую на четырехвихревое конвективное течение, что говорит о преобладании вибрационного механизма генерации конвекции. Затем вихри в углах полости затухают и для $0.06 \leq Gr < 0.15$ в полости вновь наблюдается 1-о вихревое течение с застойными зонами по углам. Границы второго интервала, где наблюдается трехвихревое течение, $0.15 \leq Gr < 0.27$. Для $\nu = 100$ и 500 отсутствуют области чисел Gr , где наблюдается чистое 4-х вихревое течение. Очевидно, что в условиях микрогравитации усиление неньютоновских свойств жидкости (увеличение параметра ν) подавляет четырехвихревое течение, характерное для термовибрационной конвекции ньютоновской жидкости.

При достижении Gr критического значения для различных ν ньютоновской моды решений стационарное конвективное течение теряет устойчивость и в полости возникают осредненные колебательные конвективные режимы. При всех исследованных значениях ν вблизи порога устойчивости в полости реализуются одинаковые по структуре и близкие по интенсивности 3-х вихревые осредненные стационарные конвективные течения. После потери устойчивости сценарии эволюции этих течений и их структуры весьма похожи.

В параграфе 4.2.2. описаны конвективные структуры неньютоновской моды для $\nu = 25, 100$ и 500 . В отличие от ньютоновской моды решений для неньютоновской моды наблюдается существенная зависимость интенсивности Ψ_{\max} течения от параметра неньютоновости. Структуры стационарных осредненных конвективных течений и характер их эволюции одинаковы для всех рассмотренных ν . Критические значения чисел Gr , при которых происходит смена структуры течения, зависят от параметра неньютоновости.

При малых значениях Gr реализуется слабоинтенсивное трехвихревое течение, затем в центральном вихре появляется два центра, и он, при дальнейшем увеличении Gr , разделяется на два отдельных вихря. Осредненное конвективное течение в этом случае приобретает четырехвихревой вид, характерный для термовибрационной конвекции в невесомости. Изолинии поля температуры при этом искривлены слабо, что свидетельствует о теплопроводном механизме переноса энергии в полости.

На кривых $3'$ для $\nu = 25$, $3''$ для $\nu = 100$ и $3'''$ для $\nu = 500$ (рис. 4б) в точках излома происходит изменение характера течения – перестройка 4-х вихревого термовибрационного конвективного течения в 3-х вихревое, изотермы в этом случае заметно искривляются, т.е. в полости преобладает конвективный перенос тепла.

ГЛАВА 5 В пятой главе сформулирована задача термовибрационной конвекции псевдопластической жидкости в замкнутой прямоугольной полости, находящейся в невесомости и совершающей продольные высокочастотные линейно-поляризованные вибрации с малой амплитудой. Градиент температуры перпендикулярен направлению вибраций. **В параграфе 5.1** дана постановка задачи. Задача содержит четыре параметра: вибрационное число Грасгофа $G\nu = (a\omega\beta\Theta h\rho/\mu_{\infty})^2$, число Прандтля $Pr=100$, динамический предел текучести

$D = \rho h^2 A / \mu_\infty^2$, и параметр неньютоновости $\nu = A / (B \mu_\infty)$. Интенсивность вибрационного воздействия $0 \leq Gv \leq 400$. В параграфе 5.2 описаны основные результаты численных расчетов. Расчеты проводились для $D = 0.625$ и $\nu = 25, 100, 500$. На рис. 6 показаны зависимости $Nu = f(Gv)$ и максимума функции тока $\psi_{\max} = f(Gv)$ для двух значений параметра неньютоновости $\nu = 25, 100$.

При малых значениях вибрационного числа Грасгофа $0 < Gv \leq 8.5$ в полости наблюдается ползущее 4-х вихревое симметричное течение при этом число Нуссельта Nu линейно растет с увеличением Gv . Аналогичная зависимость наблюдается для максимума функции тока ψ_{\max} осредненного течения от Gv . Подобное течение наблюдается и в ньютоновской жидкости. При $Gv \geq 8.5$ происходит резкое изменение структуры стационарного течения, сопровождающееся изменением характера зависимостей $Nu = f(Gv)$ и $\psi_{\max} = f(Gv)$. Увеличение интенсивности вибраций приводит к генерации конвективных вихрей в застойных зонах, расположенных в углах полости. В полости возникает интенсивное 3-х вихревое течение, которое при $Gv \geq 50$ трансформируется в 5-и вихревое. Интенсивность угловых вихрей растет с увеличением Gv . Результаты численных расчетов выполненных для $\nu = 25$ и 100 в области значений $8.5 < Gv \leq 190$ совпадают, это говорит о слабом влиянии нелинейно-вязких свойств псевдопластической жидкости на структуру и интенсивность термовибрационной конвекции.

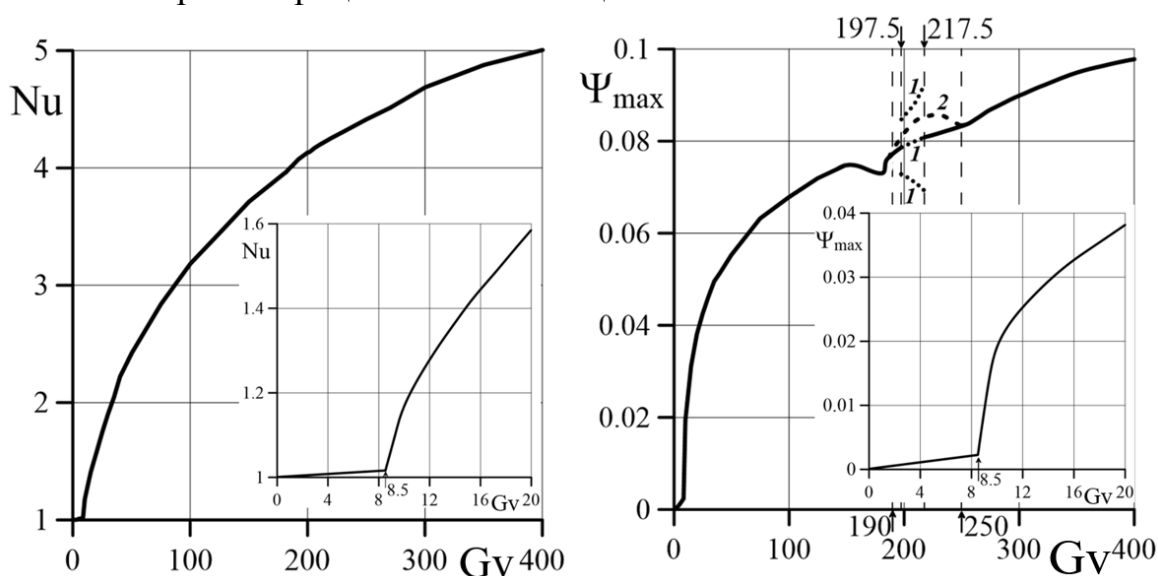


Рис. 6 Зависимость числа Нуссельта Nu (а) и максимума функции тока ψ_{\max} (б) от вибрационного числа Грасгофа Gv при $\nu = 25$ и $\nu = 100$

В интервалах $197.5 < Gv \leq 217.5$ для $\nu = 25$ и $190 < Gv \leq 250$ для $\nu = 100$ реализуется периодический колебательный режим: отклонения максимума функции тока от среднего значения находятся в пределах от 10% до 20%, а структура течения не нарушается. При увеличении ν периодические колебания становятся хаотическими. При $Gv > 215$ колебания прекращаются, режимы снова становятся стационарными 5-и вихревыми. Интенсивность угловых вихрей и их размеры становятся больше, что подавляет колебания центральных вихрей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в диссертации.

1. Сформулирована полная нелинейная задача осредненной конвекции обобщенной ньютоновской жидкости в замкнутой полости в поле высокочастотных вибраций, которая учитывает зависимость вязкости от скорости сдвига, интенсивность вибрационного воздействия и напряженность гравитационного поля. Проанализированы области применения модели.

2. Полная задача реализована в виде вычислительного кода, который позволяет рассчитывать поля функции тока осредненного и пульсационного течений, завихренность осредненного течения, поля температуры и тепловые потоки. Вычислительная реализация верифицирована.

3. Для ньютоновской жидкости, находящейся в квадратной полости подверженной высокочастотным вибрациям, получена карта конвективных режимов на плоскости управляющих параметров $Gr - V$. Вибрационный параметр варьировался в диапазоне от $0 \leq V \leq 10^4$.

4. Для значений $V < 1$ показано, что определяющую роль в генерации осредненного конвективного течения играет сила тяжести, вибрации оказывают существенное влияние на структуру и устойчивость конвективного течения ньютоновской жидкости. Когда $V \geq 1$ роль вибраций в генерации осредненных конвективных течений возрастает.

5. При $V < 0.1$ в полости реализуется 1-о вихревое осредненное стационарное конвективное течение, основным механизмом генерации которого является сила Архимеда. Когда $V \geq 0.1$ на карте конвективных режимов появляется область значений управляющих параметров, где реализуется 3-х вихревое вибрационно-конвективное течение, генерация которого обусловлена совместным действием двух механизмов: гравитационного (подъемная сила Архимеда) и вибрационного. При достижении вибрационным параметром значений $V \geq 80$ внутри области трехвихревых режимов, появляется еще одна область параметров, в которой реализуется четырехвихревое осредненное термовибрационное конвективное течение.

6. В области $10 < V \leq 10^4$ вибрации являются основным механизмом генерации осредненного конвективного течения, определяют его структуру и устойчивость. В зависимости от значений V и Gr в полости реализуются различные конвективные режимы. При малых числах Gr и относительно небольших значениях вибрационного параметра $V < 400$ в полости может наблюдаться 1-о вихревое осредненное стационарное гравитационно-конвективное течение. При повышении вибрационного параметра $V \geq 400$ реализуются только 3-х- или 4-х вихревые осредненные стационарные течения, характерные для условий микрогравитации. Дальнейшее увеличение вибрационного параметра $V > 2000$ приводит к исчезновению нижней части области 3-х вихревого течения. В полости при малых значениях числа Грасгофа Gr реализуется только 4-х вихревое термовибрационное течение, характерное для состояния невесомости.

7. Повышение числа Gr всегда приводит к потере устойчивости осредненной стационарной конвекции ньютоновской жидкости, в полости возникают колебания осредненного течения. В области $0 \leq V \leq 0.0075$ неустойчивость стационарного осредненного конвективного течения определяется гравитационными

возмущениями. При достижении числом Грасгофа критического значения Gr_1 на границе пограничного слоя и малоподвижного ядра вблизи углов полости генерируются дополнительные пульсирующие вихри, амплитуда колебаний которых растет по мере увеличения Gr . Расчеты показали стабилизацию стационарного осредненного конвективного течения относительно гравитационных возмущений при увеличении вибрационного параметра. В полости возможна реализация гравитационных возмущений двух типов: симметричных относительно поворота полости на 180° и несимметричных.

8. Для $V > 0.0075$ наиболее опасными, отвечающими за неустойчивость стационарного осредненного конвективного течения, являются вибрационные воздействия, которые для $V \leq 0.1$ представляют собой тепловые возмущения, распространяющиеся вдоль вертикальных пограничных слоев. Амплитуда тепловых волн растет с увеличением числа Грасгофа Gr и вибрационного параметра V . Расчеты показали, что при $0.0075 < V \leq 0.1$ в полости возможна реализация тепловых возмущений двух типов: симметричных относительно поворота полости на 180° и несимметричных. Если $V > 0.1$, то тепловые возмущения распространяются на всю полость, и их разделение на симметричную и не симметричную моды выявить не удастся. С увеличением вибрационного параметра устойчивость осредненной конвекции жидкости понижается.

9. Для значений вибрационного параметра $V < 100$ и незначительном превышении числом Грасгофа Gr критического значения в полости реализуются периодические колебательные режимы осредненной конвекции. При значениях $V > 100$ эти колебания становятся нерегулярными.

10. Впервые достаточно подробно исследованы конвективные течения псевдопластической жидкости в поле высокочастотных вибраций в условиях микрогравитации. Для псевдопластической жидкости вибрационный параметр V определяет еще и величину той составляющей осредненной вибрационной силы, которая связана с нелинейной вязкостью. Поэтому использование вибрационного параметра в случае неньютоновской жидкости более предпочтительно, чем традиционного для задач термовибрационной конвекции вибрационного числа Грасгофа.

11. При малых числах Gr (в условиях близких к невесомости) в полости реализуется медленное 1-о вихревое стационарное конвективное течение, которое впоследствии трансформируется в 3-х вихревое, дальнейшее увеличение числа Gr приводит к 4-х вихревому конвективному течению, характерному для термовибрационной конвекции в невесомости. При дальнейшем увеличении числа Грасгофа 4-х вихревое течение вновь трансформируется в 3-х вихревое, которое обусловлено совместным влиянием вибрационного и гравитационного механизмов генерации конвекции. Усиление неньютоновских свойств жидкости подавляет 4-х вихревое течение, характерное для термовибрационной конвекции в ньютоновской жидкости.

12. Обнаружено существование двух типов решений задачи – ньютоновская и неньютоновская моды; ньютоновская мода существует как для псевдопластических, так и для ньютоновских жидкостей. Для нее характерна слабая зависимость

структуры течений от реологических свойств жидкости; осредненное стационарное течение неустойчиво, т.е. существует пороговое число Грасгофа, при котором стационарный режим сменяется колебательным.

13. Неньютоновская мода существует только для псевдопластических жидкостей. Для нее характерно устойчивое осредненное стационарное течение во всем исследованном диапазоне чисел Грасгофа, перехода к колебательным режимам не обнаружено.

14. При ослаблении нелинейно-вязких свойств псевдопластической жидкости (в ньютоновском пределе реологической модели Уильямсона) это решение сливается с ньютоновской модой. В вязкопластическом пределе, когда жидкость становится фактически линейно-вязкой, но приобретает предел текучести, интенсивность течения на неньютоновской моде стремится к нулю.

15. Изучена эволюция термовибрационных конвективных течений в неоднородно нагретой замкнутой прямоугольной полости с псевдопластической жидкостью в условиях невесомости. Реология жидкости описывалась моделью Уильямсона. Величина вибрационного воздействия на псевдопластическую жидкость определялась вибрационным числом Грасгофа. Получены зависимости максимума функции тока и числа Нуссельта от вибрационного числа Грасгофа.

16. При значениях $Gv \leq 8.5$ в полости реализуется ползущее стационарное 4-х вихревое симметричное течение, которое в случае вязкопластического предела реологической модели Уильямсона отсутствует. Превышение Gv порогового значения 8.5 приводит к смене режима течения и возрастанию его интенсивности. Течение становится 3-х вихревым. Дальнейшее увеличение интенсивности вибраций приводит к усилению конвективных вихрей в углах полости, и при $Gv \geq 50$ 3-х вихревое течение трансформируется в 5-и вихревое. Качественный вид течений, возникающих при $8.5 < Gv \leq 190$, одинаков для разных значений параметров неньютоновости, что свидетельствует о слабом влиянии нелинейно-вязких свойств псевдопластической жидкости на структуру и интенсивность термовибрационной конвекции.

17. В области параметров $190 \leq Gv \leq 217.5$ возникают колебательные режимы термовибрационной конвекции, которые не приводят к качественному изменению структуры течения. При усилении степени неньютоновости жидкости изначально периодические колебания становятся хаотическими. При $Gv > 215$ колебания прекращаются, режимы снова становятся стационарными. Установлено, что квазиравновесное состояние псевдопластической жидкости, так же, как и ньютоновской жидкости в этом случае невозможно.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Публикации в журналах, входящих в международные базы цитирования Web of Science и SCOPUS

1. Perminov, A.V. Influence of high frequency vertical vibrations on convective regimes in a closed cavity at normal and low gravity conditions / A.V. Perminov, S.A. Nikulina, T.P. Lyubimova // Microgravity Science and Technology. – 2021. – Vol. 33, iss. 4. – Art. 55. – P. 1–18.

2. Perminov, A.V. Analysis of thermovibrational convection modes in square cavity under microgravity conditions / A.V. Perminov, S.A. Nikulina, T.P. Lyubimova // Microgravity Science and Technology. – 2022. – Vol. 34, iss. 3. – Art. 34. – P. 1–10.

3. Никулина, С.А. Конвективные режимы псевдопластической жидкости в квадратной полости при воздействии высокочастотных вибраций в условиях пониженной гравитации / С.А. Никулина, А.В. Перминов, Т.П. Любимова // Вычислительная механика сплошных сред. – 2024. – Т. 17, № 2. – С.202-218.

Публикации в журналах, входящих в Перечень ВАК

4. Никулина, С.А. Термовибрационная конвекция псевдопластической жидкости в прямоугольной полости / С.А. Никулина, А.В. Перминов, Т.П. Любимова // Вестник Пермского университета. Физика. – 2020. – Вып. 3. – С. 14–23.

Подписано в печать 15.03.2024. Тираж 100 экз.
Усл. печ. л. 2,0. Формат 60×90/16. Заказ № 729/2023

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии издательства Пермского национального исследовательского
политехнического университета
614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.
Тел. (342) 219-80-33