

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию *Никулиной Светланы Анатольевны «ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВИБРАЦИЙ И ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ НА КОНВЕКТИВНЫЕ ТЕЧЕНИЯ НЬЮТОНОВСКОЙ И ПСЕВДОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТЕЙ»*

по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация Никулиной Светланы Анатольевны посвящена теоретическому исследованию влияния высокочастотных вибраций и гравитационного поля различной интенсивности на конвективные течения ньютоновской и псевдопластической жидкостей.

Изучение движения жидкости с давних времен является источником большого числа задач в современной механике. Исследование свободноконвективных течений вязких жидкостей при наличии высокочастотных вибраций и гравитационного поля различной интенсивности может придать большую степень универсальности и законченность современной механики жидкости, а также существенно расширить возможности её фундаментального и прикладного применения. В связи с этим исследование структуры течения вязких сред не только с ньютоновской, но и неньютоновской реологией при наличии совместного влияния гравитационного и вибрационного воздействий различной интенсивности является важной фундаментальной задачей для развития современной науки.

Развитие аэрокосмических технологий, эффективная организация перекачки компонент топлива на околоземной космической орбите делает актуальными задачи исследования течений вязких жидкостей в условиях невесомости и микрогравитации при наличии высокочастотных вибрационных воздействий. Решение подобного рода задач является важным в процессе проектирования аэрокосмических систем и оптимизации рабочих процессов, реализующихся в них.

Таким образом, тема диссертационной работы Никулиной Светланы Анатольевны, посвященная исследованию течений со свободной поверхностью вязких жидкостей в каналах сложной формы, является **актуальной** как с **практической**, так и с **фундаментальной** точки зрения.

Степень разработанности темы исследования. Влияние вибраций на движение ньютоновской жидкости в плоской постановке исследовалось большим количеством ученых: Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицким, Д.В. Любимовым (Пермская гидродинамическая школа), 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 отсутствии 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. Многочисленные исследования течения реологически сложных сред были выполнены в работах Климова Д.М., Перминова А.В., Малкина А.Я., Шрагера Г.Р., Якутенка В.А.,

Борзенко Е.И., Яблонского В.О. и др. В своих работах авторы разработали физико-математические модели и методы численного исследования процессов течения неньютоновских сред в трубах и каналах.

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

Диссертационная работа Никулиной Светланы Анатольевны состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитированной литературы, включающего 111 наименований. Общий объем диссертационной работы 163 страницы, включая 49 рисунков и 3 таблицы.

Во введении автор обосновывает актуальность работы, формулирует цель и задачи исследования, обсуждает степень разработанности темы исследования, приводит результаты, свидетельствующие о научной новизне и практической значимости работы, формулирует цель и задачи исследования, излагает основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится обзор литературных источников, посвященных исследованию течений вязких жидкостей в поле высокочастотных вибраций, анализируются достоинства и недостатки существующих в настоящее время расчетных методик.

Во второй главе дано определение и классификация обобщенных ньютоновских жидкостей, приведены их примеры, сформулирована полная нелинейная задача осредненной конвекции обобщенной ньютоновской жидкости в замкнутой полости в поле высокочастотных вибраций, выписаны уравнения термовибрационной конвекции для псевдопластической жидкости, находящиеся в замкнутой прямоугольной полости в поле тяжести, к которым применен метод осреднения, обоснована роль вибрационного параметра V , и его значение для определенного класса задач термовибрационной конвекции, проведены числовые оценки (для нефти) параметров задачи, описана численная реализация и верификация модели

В третьей главе исследовано влияние высокочастотных вибраций на конвекцию ньютоновской жидкости в квадратной полости, которая совершает линейно-поляризованные высокочастотные вибрации в направлении гравитационного поля.

Четвертая глава посвящена исследованию конвективных режимов псевдопластической жидкости в квадратной полости с твердыми идеально теплопроводными границами в условиях микрогравитации.

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.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты диссертационной работы, указаны перспективы дальнейших исследований.

Целью работы является исследование структуры течения и теплообмена ньютоновской и псевдопластической жидкости Уильямсона в замкнутой прямоугольной

полости при наличии совместного влияния гравитационного и вибрационного воздействий различной интенсивности.

Для достижения поставленной цели были решены **следующие задачи**.

- проведен анализ и обобщение существующих подходов к описанию физических эффектов, возникающих при вибрационном воздействии на ньютоновскую и псевдопластическую жидкосте;
- выполнено 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;
- определены границы устойчивости стационарных осредненных конвективных течений ньютоновской и псевдопластической жидкостей при варьировании управляющих параметров.

Научная новизна результатов диссертационной работы Никулиной Светланы Анатольевны обусловлена получением ряда новых ранее неизвестных результатов, позволяющих достаточно точно описать течение и теплообмен вязких жидкостей при наличии совместного влияния гравитационного и вибрационного воздействий различной интенсивности.

Проведенные исследования позволили детально изучить характерные особенности рассматриваемых процессов и оценить влияние вязких, гравитационных и вибрационных факторов на структуру потоков, формирование и эволюцию конвективных течений, а также особенности теплообмена.

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.

К **основным научным результатам, полученным лично соискателем**, относятся результаты математического моделирования течений и теплообмена вязких жидкостей различной реологии в прямоугольной полости при наличии совместного влияния гравитационного и вибрационного воздействий различной интенсивности. Соискателем сформулирована нелинейная задача осредненной конвекции ньютоновской и псевдопластической жидкостей в замкнутой полости в поле высокочастотных вибраций и показано, что вклад нелинейной вязкости в генерацию осредненной конвекции определяется специальным вибрационным параметром V ; исследована структура конвективных течений ньютоновских и псевдопластических жидкостей при различных значениях управляющих параметров, определена граница устойчивости осредненного конвективного течения высоковязкой ньютоновской жидкости, 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, обнаружены два типа решений в задаче об осредненной конвекции псевдопластической

жидкости в замкнутой полости при воздействии высокочастотных вибрации в условиях микрогравитации.

Практическое значение работы заключается в возможности использования полученных результатов для создания и оптимизации высокоэффективных технологий, связанных с перекачкой и смешением вязких жидкостей в технологических устройствах в условиях невесомости и микрогравитации.

Теоретическая значимость работы заключается в систематическом изучении теплообмена и структуры течений вязких жидкостей при наличии воздействия высокочастотных вибраций в условиях нормальной, пониженной и микро- гравитации.

Методология и методы исследования включали в себя формулировку физической и математической модели, построение вычислительного алгоритма, верификацию полученных данных, а также численные исследования. При расчете двумерных течений жидкостей применялся метод конечных разностей. Для решения уравнения движения использовались переменные: завихренность – функция тока. Уравнения движения решались по явной конечно-разностной схеме. Уравнение Пуассона решалось методом последовательной верхней релаксации. Численный код создавался лично под руководством научного руководителя

Объектом изучения являются ньютоновская и псевдопластическая жидкость Уильямсона.

Достоверность результатов обеспечивалась использованием физически корректной математической модели, тестированием и верификацией расчётного алгоритма.

Основные положения, рекомендации и выводы, содержащиеся в диссертации, представляются научно обоснованными и достоверными.

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».

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненного автором анализа литературы, а также проведенных исследований:

- сформулирована математическая модель и проведено математическое моделирование течений вязких жидкостей при варьировании интенсивностей гравитационного и вибрационного воздействий;
- 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;
- определена граница устойчивости осредненного конвективного течения высоковязкой ньютоновской жидкости на плоскости управляющих параметров число Грасгофа Gr – вибрационный параметр V ;

- 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;
- обнаружены два типа решений в задаче об осредненной конвекции псевдопластической жидкости в замкнутой полости при воздействии высокочастотных вибрации в условиях микрогравитации.

Полученные в данной работе результаты открывают несколько направлений дальнейших исследований, связанных с моделированием течений неньютоновских сред в сложных динамических условиях, анализом влияния реологических свойств жидкости на структуру течения и формирование свободной конвекции.

Результаты проведенных исследований можно квалифицировать как **решение задачи, имеющей существенное значение для развития механики жидкости**, применительно к исследованию течений и теплообмена вязких сред при наличии совместного влияния гравитационного и вибрационного воздействий различной интенсивности.

Полнота изложения материалов диссертации достаточно высока. 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.

Содержание автореферата **соответствует** основным положениям диссертации.

Несмотря на перечисленные достоинства диссертационной работы, считаю необходимым сформулировать **рекомендации и пожелания**, а также обратить внимание на **замечания** и дискуссионные моменты:

1. Выбор шага по времени является важным при решении нестационарных задач. Соискателю следовало бы привести данные о выборе величины шага по времени, а также точность интегрирования уравнений по времени.
2. Рассмотренные прямоугольные конфигурации являются следствием использованных методических подходов, основанных на использовании переменных: завихренность – функция тока. Поскольку реальные течения всегда являются трехмерными, диссертанту следует оценить возможность применения плоской постановки. В перспективе для проведения дальнейших исследований диссертанту рекомендуется использовать естественные переменные: скорость – давление.
3. Диссертанту следует указать, при каких пороговых значениях определяющих параметров ламинарный режим течения и теплообмена переходит в турбулентный.
4. При анализе структуры течения диссертант использует поля функции тока осредненного течения и функции тока амплитуды пульсационного течения. Для характеристики течения ньютоновской жидкости этой информации достаточно. Однако для описания структуры течения неньютоновских сред важную информацию о структуре течения дает распределение в потоке интенсивности скоростей сдвиговых деформаций (второй инвариант скорости сдвига). Диссертанту в дальнейших исследованиях рекомендуется использовать этот параметр для характеристики течения в дальнейших исследованиях. Также для увеличения информативности

