

ОТЗЫВ

официального оппонента к.ф.-м.н. Субботина С.В.
на диссертационную работу Никулиной Светланы Анатольевны
“Конвективные режимы ньютоновской и псевдопластической
жидкостей в поле высокочастотных вибраций”, представленную на
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертационная работа Никулиной С.А. посвящена одной из интересных и важных задач в теории вибрационной тепловой конвекции – исследованию влияния высокочастотных вибраций на динамику ньютоновской и псевдопластической жидкости в замкнутой полости. Известно, что даже при поступательных вибрациях, вследствие нелинейности уравнений Навье-Стокса, возникает средняя массовая сила, способная возбудить конвективное течение. Это традиционное направление для пермской гидродинамической школы, тем не менее, в работе Светланы Анатольевны сделано существенное усложнение задачи благодаря учёту реологических свойств жидкостей. В первую очередь интерес обусловлен широким распространением таких жидкостей в промышленности и необходимостью предсказывать их поведение при различных нагрузках. Конечно же, всё это приводит к кратному увеличению числа параметров, которые нужно учитывать в уравнениях, поэтому численный счёт здесь логично выступает в качестве основного метода исследований. Сказанное определяет несомненную **актуальность работы.**

Содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы из 128 наименований и списка сокращений и условных обозначений. Общий объем работы – 163 страницы, включая 49 рисунков и 3 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, кратко описаны методология и методы исследований, перечислены положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации результатов, личном вкладе и структуре работы.

Первая глава посвящена описанию современного состояния исследований. Первоначально внимание уделено классическим результатам по вибрационной тепловой конвекции ньютоновской жидкости при различных типах вибраций; рассмотрены особенности динамики однофазных и многофазных систем, содержащих включения в жидкости. Далее

приведены работы по конвекции неньютоновской жидкости в поле высокочастотных вибраций, определен объект исследования и сформулирована потребность в данном диссертационном исследовании.

Во второй главе приведена классификация обобщенных ньютоновских жидкостей, описаны реологические модели, приведены примеры. В 2.2 выполнена общая постановка задачи. Рассматривается замкнутая прямоугольная полость, заполненная обобщённой ньютоновской жидкостью. Плотность совершает линейно-поляризованные высокочастотные малоамплитудные вибрации вдоль вертикальной оси. На вертикальных границах задана разность температур, градиент температуры направлен поперек оси вибраций; сформулированы уравнения вибрационной тепловой конвекции для псевдопластической жидкости, найденные методом осреднения. Большое внимание уделено анализу основных безразмерных параметров, описывающих задачу. Отдельно обсуждается роль вибрационного параметра V , который характеризует интенсивность вибрационного воздействия; сделаны оценки параметров в области применения модели. Приведены три математические модели, решаемые в рамках диссертации.

В третьей главе численно исследовано влияние высокочастотных вибраций на конвекцию ньютоновской жидкости в квадратной полости при высокочастотных вибрациях в направлении гравитационного поля. Изучена эволюция осредненных конвективных режимов, на плоскости параметров число Грасгофа Gr – вибрационный параметр V . Основные результаты разбиты на три подраздела: $V < 0.1$, $V \geq 0.1$ и $V \geq 10$. При $V < 0.1$ определяющую роль играет сила тяжести, тем не менее, вибрации тоже вносят свой вклад. Здесь возникает стационарное одновихревое осредненное конвективное течение, которое теряет устойчивость с ростом Gr . Возбуждаются периодические колебательные режимы течения, которые при больших Gr становятся квазипериодическими. Интересно, что при $V < 0.0075$ потеря устойчивости определяется гравитационным механизмом, а при $0.0075 < V < 0.1$ – вибрационным механизмом. При $V \geq 0.1$ роль вибрационного механизма становится более существенной. В этом случае в надкритической области реализуется трёхвихревое стационарное течение. Критическое значение Gr , при котором возникает трехвихревое течение, понижается с ростом V , а область параметров, где существует такое течение, расширяется. При дальнейшем повышении Gr стационарное трехвихревое течение становится неустойчивым. Возникают колебательные режимы конвекции, которые могут быть как симметричными и несимметричными. При $V \geq 10$ вибрации полностью определяют структуру и устойчивость течения. Рассмотрена перестройка течения с ростом параметра V . Показано,

что в предельных случаях малых и больших V (условия, близкие к невесомости), результаты расчетов согласуются с данными других авторов.

В четвертой главе исследованы конвективные режимы псевдопластической жидкости в квадратной полости в условиях микрогравитации, $V \gg 0.1$. Полость также совершает вертикальные линейно-поляризованные высокочастотные вибрации, а на вертикальных границах задан перепад температуры. Реология жидкости описывается моделью Уильямсона. Сначала также возникает одновихревое стационарное конвективное течение, которое с ростом Gr трансформируется в трех или четырехвихревое. Показано, что усиление неньютоновских свойств жидкости подавляет четырехвихревое течение, характерное для термовибрационной конвекции в ньютоновской жидкости. Важно отметить, что были обнаружены два типа решений, условно названными *ньютоновской* и *неньютоновской* модами. Первый существует как для псевдопластических, так и для ньютоновских жидкостей. В случае псевдопластической жидкости для неё характерна слабая зависимость структуры течений от реологических свойств жидкости. В свою очередь стационарная неньютоновская мода существует только для псевдопластических жидкостей и является устойчивой, т.е. во всем исследованном диапазоне Gr перехода к колебательным режимам не обнаружено.

Наконец, **в пятой главе** исследовано влияние продольных высокочастотных линейно-поляризованных вибраций на структуру и интенсивность течений псевдопластической жидкости Уильямсона в замкнутой прямоугольной полости, находящейся в невесомости. Градиент температуры перпендикулярен направлению вибраций. В отличие от предыдущих случаев $V \rightarrow \infty$, поэтому интенсивность вибрационного воздействия определялась вибрационным числом Грасгофа Gv . В данном разделе получены карты течений на плоскости параметров числа Нуссельта Nu и Gv . Обнаружена область колебательного режима конвекции и показано, что при усилении степени неньютоновости жидкости колебания становятся квазипериодическими.

В заключении сформулированы основные результаты и итоги выполненного исследования.

Теоретическая значимость работы обусловлена обилием полученных закономерностей в неньютоновских жидкостях при вибрационном воздействии, в том числе и в условиях невесомости. С другой стороны, известно, что вибрационное воздействие может использоваться в качестве инструмента для управления неизотермическими жидкостями. Знания о динамике неньютоновских жидкостей в вибрационных полях важны для промышленности, в которой производятся и перерабатываются жидкости с

реологическими свойствами. Сказанное определяет **прикладной потенциал** результатов исследования.

Обнаруженные в рамках диссертационного исследования явления обладают **научной новизной**. Можно отметить несколько ярких результатов:

1. Впервые сформулирована нелинейная задача осреднённой конвекции ньютоновской и псевдопластической жидкости при высокочастотных вибрациях. Выполнена классификация режимов течений в широком диапазоне вибрационного параметра V .
2. Обнаружено, что при больших значениях Gr возможна реализация симметричных и несимметричных колебательных мод.
3. Впервые исследовано влияние реологических свойств жидкости в замкнутой полости при высокочастотном вибрационном воздействии.

Основные научные результаты обсуждались на авторитетных семинарах и конференциях и в достаточной степени опубликованы в 17 работах, 3 из которых в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science Scopus, 1 статья в российском журнале из перечня ВАК.

В целом после прочтения диссертация Никулиной С.А. оставляет благоприятное впечатление. Работа выполнена на высоком научном уровне, написана грамотным языком. Особенно хочется отметить вторую главу, где дана подробная классификация неньютоновских жидкостей, сформулирована математическая постановка задачи и приведены оценки применимости результатов модели к реальным системам. Это очень важно для численной работы и является показателем глубины понимания проблемы автором. Многие вопросы, поднятые в работе, могут являться основой для экспериментальных исследований. Объем полученных и проанализированных данных достаточно большой. **Достоверность основных результатов и выводов** не вызывает сомнений, все обнаруженные особенности детально исследованы и проанализированы; отдельный подраздел диссертации посвящён исследованию сходимости решений при сгущении расчетной сетки. Несмотря на сказанное по диссертации могут быть высказаны следующие **замечания и вопросы**:

1. В первой главе приводится современное состояние исследований по теме диссертации, в том числе в разделе 1.2 описываются результаты изучения конвекции неньютоновской жидкости в вибрационных полях. К сожалению, обзор сделан в реферативной форме, когда перечисляется много разнообразных задач, но глубокий анализ не проводится. Поскольку работа задумывалась как развитие фундаментальных основ теории вибрационной тепловой конвекции линейно и нелинейно вязких сред, полезно было бы

более конкретно обозначить существующие «белые пятна», которые закрывает диссертация.

2. Очень удобно, что автор на отдельной странице приводит список сокращений и условных обозначений. Тем не менее, в ряде случаев существует путаница в обозначениях одних и тех же физических величин. Например, и коэффициент неньютоновости и кинематическая вязкость жидкости обозначены как ν ; на стр. 4 параметр Θ – это характерная разность температур, а на стр. 38 уже просто температура; на стр. 49 неудачно обозначена пространственная производная как $\bar{\delta}$, поскольку δ – это аспектное соотношение; на стр. 74 и далее t – это безразмерное время, а в номенклатуре на стр. 4 эта величина измеряется в секундах.

3. Почему в (2.2) частота ω оценивается через μ_0 , а далее, например, на стр. 45, 55, 57 и т.д. через μ_∞ . Здесь же можно отметить, что единицы измерения скорости в разделе 2.5 на стр. 44 не такие как на стр. 51 и 54. Пояснения на этот счет в диссертации отсутствуют.

4. Судя по рис. 2.2 на стр. 37 горизонтальный размер ячейки составляет $2h_x$, тогда аспектное соотношение для квадратной ячейки $\delta = 1/2$, а не $\delta = 1$, как отмечено на стр. 53.

5. Почему в диссертации не используется такой важный параметр, как безразмерная частота вибраций $W = \omega h^2 / \nu$, где ν – кинематическая вязкость жидкости. Да, на странице 45 вводится обратное соотношение α , но оно является частью вибрационного параметра V и не используется для анализа результатов.

6. Последовательность описания разделов 2.7.1 – 2.7.3 нелогичная. Целесообразно прежде рассмотреть 2.7.3 и только потом остальное.

7. Стр. 68: можно ли количественно сравнить пороговый переход к колебательному режиму III с работой [41]?

8. Стр. 76 и далее. Автор приводит временную динамику различных параметров, которая могут быть достаточно сложной. Например, на рис. 3.6а можно выделить несколько гармоник, а не одну, которая получила описание. Сопровождение данных спектрами могло бы дать очень интересную информацию. Особенно это касается области больших чисел Грасгофа, где наблюдаются многоячеистые структуры. Аналогичные замечания к сопровождению рис. 3.15 и 3.21. Было бы очень любопытно сделать попытку отфильтровать данные по основным гармоникам.

9. Глава 5 немного выбивается из общей картины. Здесь рассматриваются вибрационные конвективные режимы псевдопластической жидкости в условиях невесомости в прямоугольной полости. В этом случае вибрационный параметр $V \rightarrow \infty$. Можно ли сравнить эти результаты

(границы режимов) с тем, что было получено в предыдущих главах в терминах других безразмерных чисел.

Заключение. Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации Никулиной Светланы Анатольевны. Представленный материал следует признать целостной и законченной диссертацией, уровень и результаты которой соответствуют критериям, установленным Положением «О порядке присуждения ученых степеней», а автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Доцент кафедры физики и технологии
ФГБОУ ВО «Пермский государственный
гуманитарно-педагогический университет»,
кандидат физ.-мат. наук



Субботин Станислав

Валерьевич

5.11.2024

Адрес: 614990, г. Пермь, ул. Сибирская, д. 24,
ПГГПУ, <http://pspu.ru>
Телефон – 8-952-326-54-17
E-mail: subbotin_sv@pspu.ru

Подпись Субботина С.В. заверяю

Ученый секретарь ФГБОУ ВО "ПГГПУ"
Гранкина Е.Н.

