

ОТЗЫВ

официального оппонента Головизнина Василия Михайловича на диссертационную работу Куликова Юрия Матвеевича «Устойчивость и турбулентность течений термовязкой жидкости» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Работа посвящена исследованию стационарных режимов течения жидкости с сильной зависимостью коэффициента вязкости от температуры (термовязкой жидкости). Их устойчивости и переходу к турбулентности методом численного моделирования.

Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста, заключения и списка литературы, насчитывающего 245 источников.

Во введении определяется объект исследования, его научная новизна, теоретическая и практическая значимость и формулируются положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации носит вводный характер. В ней дается краткий обзор основных вех в истории развития представлений о турбулентности и методах ее численного моделирования, дается определение термовязких жидкостей (ТВЖ) и элементы их классификации. Отмечается, что к термовязким жидкостям относятся, в частности, магматические расплавы и минеральные масла. Приводится краткий обзор работ по гидродинамике ТВЖ и формулируется постановка задачи по исследованию устойчивости ТВЖ – течений и развитию в них турбулентности

Вторая глава диссертации посвящена изучению свойств напорных течений термовязких жидкостей. Рассматривается задача о стационарном плоском течении ТВЖ между пластинами с разной температурой и анализируется ее аналитическое решение (Wall D.P., Wilson S.K. 1996), зависящее от двух параметров – перепада температур между пластинами и показателя экспоненты в коэффициенте вязкости. Указывается, что при некоторых соотношениях этих параметров профиль скорости имеет точку перегиба, что может приводить к развитию неустойчивости.

Далее исследуется вопрос о длине установления стационарного профиля плоского термовязкого течения. В математическом плане задача сводится к нелинейному параболическому уравнению, в котором ось «икс» играет роль времени. В качестве начального условия задается форма профиля течения на входе в канал. Численное решение ищется методом конечных разностей по неявной схеме. Нелинейные члены берутся с предыдущего слоя. Показано, что длина установления нелинейным образом зависит от числа Рейнольдса.

Основной темой второй главы является исследование линейной устойчивости стационарного профиля ТВЖ с точкой перегиба. Для этого уравнение Орра – Зоммерфельда обобщается на случай экспоненциальной зависимости коэффициента вязкости от температуры. Приводится краткий обзор методов численного решения классического уравнения. Модифицированное на случай ТВЖ уравнение Орра – Зоммерфельда предлагается решать с использованием разложения по многочленам Чебышева. Верификация численного метода проводится на течении Пуазейля. Демонстрируется хорошее совпадение результатов с классическими.

Для исследования степени достоверности результатов была проделана методическая работа по исследованию относительной ошибки в определении собственных чисел в зависимости от числа членов разложения. Показано, что относительная ошибка ведет себя немонотонно и имеет минимум в интервале 50 – 100 членов разложения. В работе построены кривые нейтральной устойчивости для различных значений безразмерного параметра, характеризующего разность температур на верхней и нижней стенках. Показано, что течение становится неустойчивым для длинноволновых возмущений, причем при уменьшении разности температур критические значения чисел Рейнольдса уменьшаются.

В работе описывается эволюция наименее устойчивой моды. Отмечается, что собственные функции модифицированного оператора Орра – Зоммерфельда не обладают свойствами симметрии или антисимметрии, нельзя также выделить пристеночные и центральные моды как для классического течения Пуазейля.

В результате расчетов были получены спектральные портреты, существенно отличающиеся как от плоского, так и осесимметричного течения Пуазейля.

В третьей главе диссертации излагается численный метод КАБАРЕ для решения гидродинамических задач в приближении слабой сжимаемости и приводится результат выполненного автором верификационного расчета течения Пуазейля.

Четвертая глава диссертации посвящена анализу численных решений, полученных по схеме КАБАРЕ, двух классических задач, в которых происходит изотермический ламинарно – турбулентный переход. Это плоская задача об эволюции двойного вихревого слоя и трехмерная задача о распаде двумерного вихря Тейлора – Грина.

Двумерная задача об эволюции двойного вихревого слоя решалась в квадратной области с периодическими граничными условиями на последовательности сгущающихся ортогональных расчетных сеток с количеством узлов 128, 256, 512, 1024 и 2048 по каждой из сторон и различных числах Рейнольдса. Исследовалось поведение кинетической энергии, скорости ее диссипации, энтрофии и поленстрофии со временем, а также спектральной плотности кинетической энергии и двухточечных корреляций и проводилось сравнение с результатами, полученными в расчетах других авторов по альтернативным методикам. Автор пришел к выводу, что схема КАБАРЕ успешно описывает основные характеристики двумерной турбулентности.

Распад вихря Тейлора – Грина рассчитывался в кубической области на регулярной расчетной сетке с количеством узлов 64, 128 и 256 по каждому ребру куба при числах Рейнольдса 100, 280, 1600, 4000. При этом наблюдались различные режимы распада исходного течения, как ламинарные, так и турбулентные. В турбулентных режимах на основе анализа фурье-анализа кинетической энергии установлено соответствие наклона энергетического спектра теории однородной изотропной турбулентности.

Сравнение результатов моделирования с распада вихря Тейлора – Грина из различных источников показало, что для разрешения мелких вихревых структур переход на более мелкие сотки при использовании схемы КАБАРЕ может оказаться более результативным по сравнению с использованием альтернативных методов более высокого порядка точности.

Пятая глава содержит описание основных результатов по моделированию сдвиговых течений термовязкой жидкости. Здесь рассмотрены три задачи:

- задача о перемешивании термовязкой жидкости в плоском течении, возникающем под воздействием гармонических возмущений от входной границы расчетной области;
- задача о смешении слоистого течения с различными вязкостями, и
- задача о турбулентном смешении в напорном течении термовязкой жидкости в трехмерной области, периодически продолженной в двух направлениях.

В первой задаче в качестве начальных данных задается стационарное термовязкое течение между двумя пластинами, имеющее в профиле скорости точку перегиба. В результате наложения гармонического возмущения скорости на входной границе в расчетах образуются когерентные структуры, распространяющиеся вниз по потоку. На расстоянии в 10 калибров происходит крупномасштабный захват слоев жидкости с разной температурой с образованием «больших клубов». Одной из основных «наблюдаемых» величин является толщина слоя смешения, эволюция которого оказывается зависящей от амплитуды возмущения в большей степени, чем от числа Прандтля. Кроме этого, приводится детальное описание ряда других характеристик моделируемого течения.

Вторая задача описывает динамику горячей плоской термовязкой струи, проникающей в холодную окружающую жидкость. Показано, что в начальный момент времени торможение захватывает только внешние области струи, затем вязкость приводит к замедлению слоев, располагающихся ближе к центральной оси. Наконец, вся струя превращается в пограничный слой, в котором начинают развиваться процессы перемешивания.

Расчеты подтверждают результаты экспериментов. Показано, что численные значения гидродинамических величин – инкремента неустойчивости и толщины потери импульса обладают различными скоростями сеточной сходимости.

Для постановки задачи о трехмерных турбулентных течениях термовязкой жидкости автор проделал серьезную работу по выбору начального профиля среднего течения. Был разработан генератор возмущений скорости, имеющий заданные статистические характеристики. Результаты расчетов предоставили обширный материал для последующей статистической обработки, результатам которой посвящена оставшаяся часть главы.

В заключении к диссертации приведены основные результаты работы, сведенные в 7 защищаемых положений. В моей интерпретации они выглядят следующим образом:

1. Получена форма профиля скорости при плоском течении термовязкой жидкости между двумя пластинами, имеющая, при определенных параметрах точку перегиба.
2. Получено обобщение уравнения Орра – Зоммерфельда для определения линейной устойчивости течений термовязкой жидкости, разработан алгоритм его численного решения, проведен анализ влияния на устойчивость безразмерных параметров задачи.
3. Разработана компьютерная программа, реализующая схему КАБАРЕ в приближении слабосжимаемой жидкости и ориентированная на использование многопроцессорных вычислительных комплексов с распределенной памятью. Проведена ее верификация на классических задачах о ламинарно – турбулентных переходах.
4. Выполнены расчеты эволюции гармонических возмущений поперечной скорости в плоском термовязком течении с точкой перегиба. Показано существование четырех

- областей течения, в которых возможна активная филаментация турбулентной пелены или длительное существование вихревых структур.
5. Получена оценка длины установления стационарного профиля в ТВЖ в плоском канале как функции безразмерного параметра перепада температур между пластинами.
 6. Проведено численное моделирование трехмерных турбулентных режимов течения ТВЖ на последовательности расчетных сеток при различных безразмерных параметрах. Описана структура течения в горячем пристенке, продемонстрировано развитие шпилькообразных вихрей, выявлено существование длинных вихревых образований на дальних стадиях эволюции течения.
 7. Проведены оценки интегральных масштабов трехмерной турбулентности в ТВЖ на основе анализа корреляционных функций.

Диссертационная работа Куликова Юрия Матвеевича имеет большую теоретическую и практическую значимость. Результаты изучения характеристик крупномасштабного вовлечения и последующего перемешивания слоев жидкости с разной температурой расширяют представления о турбулентности, возникающей в течениях со стратификацией материальных параметров, в частности, с вязкой стратификацией в неоднородном температурном поле. Практическая значимость заключается в том, что показано, что зависимость вязкости от температуры влияет не только на профиль установившегося течения, но на его устойчивость.

Следует особо отметить прекрасный литературный язык и хорошо продуманную структуру текста диссертации. Все результаты, полученные в работе, являются новыми и научно обоснованными. Они достаточно полно опубликованы в 9 научных публикациях в изданиях, рекомендованных ВАК и индексируемых в системах цитирования Web of Science и Scopus. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Замечания.

При реализации схемы КАБАРЕ автор использовал аппроксимацию тензора вязких напряжений с первым порядком по времени. Без каких либо усложнений можно было повысить порядок аппроксимации до второго.

Это ни в коем случае не умаляет высокую оценку этой во многом выдающейся работы.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Куликов Юрий Матвеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Отзыв составил доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры вычислительных методов, заведующий лабораторией индустриальной математики Факультета вычислительной математики и кибернетики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» Головизнин Василий Михайлович.

Головизнин В.М.
«14» апреля 2019 г.



Подпись удостоверяю
Ведущий специалист по кадрам

Т.Г. Коваленко