

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета Д 002.110.03 на базе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Объединенного института высоких температур Российской академии наук
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)
от 15 мая 2019 г. (протокол № 9)

Защита диссертации **Куликова Юрия Матвеевича**
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
«Устойчивость и турбулентность течений термовязкой жидкости»

Специальность 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета Д 002.110.03 на базе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Объединенного института высоких температур Российской академии наук
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)
Протокол № 9 от 15 мая 2019 г.

Диссертационный совет Д 002.110.03 утвержден Приказом Министерства образования и науки РФ от 15.02.2013 г. № 75/нк в составе 25 человек. На заседании присутствуют 17 человек, из них 12 докторов наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы и 5 докторов наук по специальности 05.14.01 – энергетические системы и комплексы. Дополнительно введены на разовую защиту 0 человек. Кворум имеется.

Председатель – председатель диссертационного совета Д 002.110.03

д.ф.-м.н., профессор, член-корреспондент РАН Варакин А.Ю.

Ученый секретарь – ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.03

д.т.н. Директор Л.Б.

1	Варакин А.Ю.	чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	01.02.05	Присутствует
2	Батенин В.М.	чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор	05.14.01	Отсутствует
3	Директор Л.Б.	д.т.н.	05.14.01	Присутствует
4	Алхасов А.Б.	д.т.н., профессор	05.14.01	Отсутствует
5	Аминов Р.З.	д.т.н., профессор	05.14.01	Отсутствует
6	Баженова Т.В.	д.ф.-м.н., профессор	01.02.05	Присутствует
7	Битюрин В.А.	д.ф.-м.н., с.н.с.	01.02.05	Отсутствует
8	Воробьев В.С.	д.ф.-м.н., профессор	01.02.05	Присутствует
9	Зайченко В.М.	д.т.н., с.н.с.	05.14.01	Присутствует
10	Зейгарник В.А.	д.т.н., с.н.с.	05.14.01	Присутствует
11	Климов А.И.	д.ф.-м.н., с.н.с.	01.02.05	Присутствует
12	Кобзев Г.А.	д.ф.-м.н., профессор	01.02.05	Присутствует
13	Красильников А.В.	д.т.н., с.н.с.	01.02.05	Присутствует
14	Леонов С.Б.	д.ф.-м.н.	01.02.05	Отсутствует
15	Масленников В.М.	д.т.н., профессор	05.14.01	Отсутствует
16	Медин С.А.	д.т.н., профессор	01.02.05	Присутствует
17	Недоспасов А.В.	д.ф.-м.н., профессор	01.02.05	Отсутствует
18	Поляков А.Ф.	д.т.н., с.н.с.	01.02.05	Присутствует
19	Попель О.С.	д.т.н., доцент	05.14.01	Присутствует
20	Пятницкий Л.Н.	д.ф.-м.н., профессор	01.02.05	Присутствует
21	Седлов А.С.	д.т.н., профессор	05.14.01	Отсутствует
22	Синкевич О.А.	д.ф.-м.н., профессор	01.02.05	Присутствует
23	Томаров Г.В.	д.т.н., профессор	05.14.01	Присутствует
24	Чиннов В.Ф.	д.ф.-м.н., с.н.с.	01.02.05	Присутствует
25	Шугаев Ф.В.	д.ф.-м.н., доцент	01.02.05	Присутствует

ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита диссертации научного сотрудника Лаборатории 18 – плазменных технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) **Куликова Юрия Матвеевича** на тему «Устойчивость и турбулентность течений термовязкой жидкости». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы. Диссертация выполнена на кафедре физической механики Физтех-школы аэрокосмических технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, mipt.ru).

Научный руководитель:

Сон Эдуард Евгеньевич – доктор физико-математических наук, профессор, академик Российской академии наук, заведующий кафедрой физической механики Физтех-школы аэрокосмических технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)». г. Долгопрудный.

Официальные оппоненты:

Головизнин Василий Михайлович – гражданин РФ, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры вычислительных методов Факультета вычислительной математики и кибернетики, заведующий лабораторией индустриальной математики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 52, факультет ВМК);

Урманчеев Саид Федорович – гражданин РФ, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории «Механика многофазных систем» Института механики имени Р.Р. Мавлютова – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИМех УФИЦ РАН, Проспект Октября, д. 71, г. Уфа, Россия, 450054).

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный университет Петра Великого (СПбПУ, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, 195251).

На заседании присутствуют официальный оппонент д.ф.-м.н., профессор Урманчеев С.Ф., научный руководитель Куликова Ю.М. академик РАН Сон Э.Е.

СТЕНОГРАММА

Председатель

Сегодня на повестке дня у нас защита диссертации Куликова Юрия Матвеевича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему "Устойчивость и турбулентность течений термовязкой жидкости" по специальности 01.02.05 — механика жидкости, газа и плазмы.

Я предоставляю слово ученому секретарю, Леониду Бенциановичу, для того чтобы он доложил о комплектности всех материалов, необходимых для проведения нашего сегодняшнего заседания.

Ученый секретарь

(Зачитывает данные о соискателе по материалам личного дела и сообщает о соответствии представленных документов требованиям ВАК Министерства образования и науки РФ).

Председатель

Спасибо, Леонид Бенцианович! Есть ли вопросы к ученому секретарю? Если вопросов нет, тогда, Юрий Матвеевич, вам предоставляем слово для оглашения основных положений диссертации. Напоминаю, что регламент выступления 20 минут, просьба придерживаться его.

Куликов Ю.М.

Здравствуйте уважаемые члены ученого совета!

Позвольте представить вам основные результаты моделирования течений термовязкой жидкости. Я начну с определения термовязкой жидкости и основных классов веществ.

Отличительной особенностью термовязких жидкостей является существование резкой зависимости динамической вязкости от температуры. В случае если такая зависимость оказывается немонотонной, то жидкость называется аномально термовязкой. К таким средам относятся продукты переработки нефти, органические и минеральные масла, сера, жидкие металлы, в частности ртуть, расплавы силикатов, входящие в состав горных пород, а также разнообразные технические полимеры. Примерами процессов, в которых термовязкие свойства играют существенную роль, являются движение серы в каналах теплообменников и других технических устройств, течения в маслonaполненном высоковольтном и нагревательном оборудовании, движения горных расплавов, как в мантии, так и при извержениях вулканов. Отдельно стоит упомянуть также об извержениях подводных гейзеров под высоким давлением. Важность таких сред для гидродинамики была показана в экспериментах Кэмпбелла и Тернера, где изучались затопленные струи жидкости с различной вязкостью. Они показали существование безразмерного параметра, который определяет интенсивность процесса смешения в подобных задачах. После существенного перерыва данные исследования были продолжены в работе Чабры, где был показан эффект компрессии когерентных структур, который приводит к появлению картин течения, напоминающих наконечник стрелы. В настоящее время в России основные исследования термовязких сред связаны с работами Саида Федоровича Урманчеева и его коллег.

Проведенный обзор работ определил основные объект, цель и задачи предлагаемого исследования. Объектом исследования выступают сдвиговые течения ньютоновской термовязкой жидкости с экспоненциальной зависимостью вязкости от температуры. Целью данной работы является исследование характеристик устойчивости, а также процессов турбулентного перемешивания в сдвиговых течениях термовязкой жидкости. Для сокращения термина «термовязкая жидкость», будем использовать аббревиатуру «ТВЖ».

Для достижения поставленной цели необходимо было решить ряд задач, в частности, необходимо было определить влияние термовязких свойств на форму профиля, а также длину установления в установившихся течениях, разобраться с его характеристиками устойчивости, а также провести численное моделирование процессов

смешения. Для этого была проведена модификация численного метода КАБАРЕ, разработанного Василием Михайловичем Головизниным, проведена его валидация, а также решено несколько задач: в двумерной постановке — напорное течение термовязкой жидкости в плоском канале, слоистое течение термовязкой жидкости, а также моделирование трехмерного течения ТВЖ в бесконечном плоском слое.

Основным методом, использовавшимся в настоящем исследовании, стала схема КАБАРЕ. Отличительными достоинствами данного подхода являются: компактный вычислительный шаблон, обратимость по времени, также второй порядок точности на неравномерных сетках. Кроме того, схема является универсальной, не имеет каких-либо настроечных параметров и существует большой опыт её применения для слабых ударных волн, сильных разрывов, а также задач аэроакустики, горения и детонации.

Мы начнем свое рассмотрение с установившегося движения термовязкой жидкости. В частности, рассмотрим жидкость с зависимостью вязкости типа Аррениуса, которая может быть в относительно узком интервале температур преобразованием Франк-Каменецкого сведена к экспоненциальной зависимости.

В предположении установившегося теплового режима мы можем получить линейную зависимость температуры поперек канала, а также характерную форму профиля термовязкой жидкости, которая является параметрической функцией безразмерного параметра альфа. Важной особенностью данного профиля является возможность изменения его выпуклости на участке, прилегающем к холодной стенке. Выполнение условий на существование точки перегиба приводит к следующему требованию на значения параметра альфа, выделенного красной рамкой. Следует заметить, что термовязкая... для конкретной термовязкой жидкости с фиксированными значениями параметра, бета и реперной температурой T_0 ноль, существование точки перегиба определяется исключительно перепадом температур между стенками.

Затем рассматривалась задача о длине установления найденного профиля. В данном случае уравнения Навье–Стокса в предположении одномерности движения и отсутствии возвратных течений сводились к параболизированному уравнению, решение которого с помощью интегро-интерполяционного метода показало, что длина установления данного профиля является степенной функцией характерного числа Рейнольдса, где в показателе степени находится безразмерный параметр альфа.

Существование точки перегиба в рассматриваемом профиле делает интересным рассмотрение данного течения с точки зрения теоремы Релея, хотя она и формулируется для идеальной жидкости и линейной теории устойчивости. Для этого было проведено обобщение уравнения Орра–Зоммерфельда на рассматриваемый класс жидкостей, реализован численный метод на основе спектрального подхода Орзага, использующего полиномы Чебышева. В результате чего было получено семейство кривых нейтральной устойчивости, отличительной особенностью которого является расширение области неустойчивости в диапазон физически малых чисел Рейнольдса и коротких волн при увеличении модуля параметра альфа, то есть при увеличении перепада температур между стенками.

Установленная параметрическая связь между характеристиками профиля и областями устойчивости делает интересным рассмотрение данного течения с точки зрения современных методов вычислительной гидродинамики, в частности, с помощью метода КАБАРЕ. Прежде чем перейти к рассмотрению результатов моделирования неустойчивости следует обратить внимание, что одним из наиболее плодотворных методов описания турбулизированных течений является описание в терминах завихренности и её производных, — это энстрофия. Здесь также приведены основные уравнения.

Мы рассмотрим напорное течение термовязкой жидкости с характерным профилем с точкой перегиба, при этом у нас будет происходить распространение возмущений гармонической формы от входного сечения вниз по потоку. Процесс смешения будет рассматриваться в окрестности пяти изолиний, а также изолинии, соответствующей точке перегиба, изолиния ай. Это слой ноль целых шестьдесят три сотых. Для режима с числом Рейнольдса, определяемым по локальным параметрам, со значением, соответствующим ламинарно-турбулентному переходу, в окрестности точки перегиба можно рассмотреть толщину слоя смешения, а также смещение среднего положения изолинии.

Оказывается, что толщина слоя смешения и процесс крупномасштабного захвата слоев жидкости с различной температурой оказывается наиболее интенсивным в окрестности точки перегиба. Вторая величина показывает, что в среднем поток

смещается в сторону холодной стенки.

Анализ Фурье-спектров квадрата завихренности (энстрофии) и кинетической энергии показал, что в течении возможно существование когерентных структур, о чем свидетельствует участок асимптотики в спектре с наклоном минус два. Кроме того, рассматривалось влияние амплитуды возмущения на развитие течения, в частности, было указано, что при увеличении амплитуды происходит образование дорожки крупномасштабных клубов на дистанции половины длины канала, десять калибров. В тоже время в верхней области также формируются мелкомасштабные вихревые образования с размером порядка одной третьей размеров крупномасштабной дорожки.

Сейчас мы рассмотрим задачу о слоистом течении термовязкой жидкости, постановка которой была мотивирована экспериментами Кэмпбелла и Тернера. На данном слайде представлена математическая формулировка задачи. В данном случае в прямоугольной, периодически продолженной области имеется два слоя, один из них неподвижен и обладает большей вязкостью и меньшей температурой, относительно него происходит движение термовязкой жидкости с большей температурой. И одновременно задаются возмущения поперечной скорости. Характерными рассматриваемыми величинами являются инкремент неустойчивости, который определяется по скорости роста амплитудной кривой в слое смешения. Кроме того, мы рассмотрим толщину потери импульса, которая на каждом шаге по времени получается пространственным интегрированием по расчетной области.

В результате чего было получено поле значений инкремента неустойчивости в верхней части, левый слайд... левый рисунок показывает распределение значений гамма при различных отношениях вязкости, при этом по оси абсцисс отложено число Рейнольдса, определяемое обычным образом по характерному размеру расчетной области. В тоже время справа показано число Рейнольдса по начальной толщине завихренности. Данный график приводится для сравнения с результатами работы Сэндхема и Рейнольдса.

В нижней части слайда представлены временные зависимости толщины потери импульса, рассчитываемые при различных отношениях вязкости и характерных числах Рейнольдса. Столь регулярное поведение данных кривых, — зависимость типа корня из τ , — навело на мысль о поиске соответствующих асимптотических зависимостей, которые бы удовлетворяли зависимости корень из τ , принимали значение равно единице при τ стремящемся к нулю, так как мы рассматриваем нормированные величины. В частности, если выбрать вот такую функцию, тогда у нас параметр A , эмпирический, является ... определяется значением числа Рейнольдса, отношением вязкостей и скоростью звука. Расчеты показали, что последний параметр является несущественным, вот и пришла в голову мысль ввести параметр $\kappa\tau$, который является отношением числа Рейнольдса к отношению вязкостей.

В данном случае мы уже получаем семейство линейных функций, несравненно более удобное представление. Наложение дополнительных условий ограниченности и стремления к единице для параметра $\kappa\tau$ приводит к следующей асимптотике свободного пограничного слоя, которая связывается с зависимостью от корня из обратного числа Рейнольдса, корня из времени и корня из безразмерного параметра $\kappa\tau$, то есть того самого параметра, который экспериментально был указан в работе Кэмпбелла и Тернера.

В заключение мы рассмотрим моделирование трехмерного течения в бесконечном слое. В данном случае мы будем рассматривать прямоугольную область, направление потока указано синей стрелкой. В направлении x мы будем задавать периодические граничные условия с сохранением перепада давления, в направлении y у нас будут задаваться обычные периодические граничные условия, а на верхних и нижних стенках мы задаем условия прилипания жидких частиц и постоянство температуры. Здесь мы также будем задавать профиль с точкой перегиба, который является начальным условием в данной задаче.

Для корректного развития турбулентности необходимо не только генерация «обычного» случайного шума, но и проведение его дополнительной фильтрации с целью установления нужной корреляционной длины и восстановления нулевой дивергенции поля скорости, для того, чтобы исключить эффекты сжимаемости.

По результатам моделирования было установлено существование двух семейств кривых: при относительно малых числах Рейнольдса и интенсивностях возмущений происходит реламинаризация потока, после затухания случайных пульсаций. В то время как при повышении числа Рейнольдса происходит его <течения> резкая турбулизация

с падением расходных характеристик и уменьшением кинетической энергии. При этом наблюдается переход к предельному диссипативному режиму от числа Рейнольдса две триста до числа Рейнольдса четыре тысячи семьсот. Расчеты проводились на различных сетках, показано, что при измельчении сетки наблюдается сходимость значений по величине безразмерной кинетической энергии.

Данный результат также подтверждается пространственным усреднением, которое выполнялось в направлениях периодичности, то есть по x и по y . В результате мы получаем семейство зэт-тэ диаграмм. В верхней части слева представлены зэт-тэ диаграммы продольного распределения скорости в случае ламинарной эволюции, справа — в случае турбулентной. Мы видим разрушение термовязкого профиля и образование двух тонких пристеночных слоев. В нижней части слайда приведены некоторые параметры турбулентного течения, в частности, интенсивность турбулентности, а также величина турбулентной адвекции, которая характеризует перенос кинетической энергии средним полем скорости. Говоря о последней величине, можно сказать, что её наиболее существенные значения приходятся на участок, соответствующий крупномасштабному смешению от $t\tau$ двадцать до $t\tau$ сорок, где $t\tau$ — безразмерное время. Можно также проследить эволюцию данного течения в... постаравшись визуализировать вихревые поверхности с помощью Q -критерия. В данном случае здесь ось зэт является инвертированной, мы наблюдаем семейство пилообразных структур в окрестности горячей стенки, эволюция которых приводит к появлению таких вот шпильковидных и подковообразных вихрей. Затем при эволюции течения происходит развитие завихренности в основном потоке, её усиление, и её диффузия. Есть такой термин — «вымирание вихрей».

Можно также процесс смешения удобно проследить по полю температуры. Мы видим, что крупномасштабные пульсации оказываются наиболее существенными в верхней пристеночной области. Затем происходит их проникновение в центральную зону, в конечном итоге образуется достаточно выровненное поле температуры в центральном течении, а также два пристеночных тепловых слоя — у верхней стенки, с большей температурой, и у нижней, но здесь $\langle \theta \rangle$ слабо виден. При смешении образуются грибовидные структуры, связанные с процессом вымывания холодной жидкости от нижней стенки.

Данный процесс можно также проследить в динамике. В данном случае представлено распределение безразмерной приведенной температуры, то есть от минус одного до одного. Моделирование проводилось на сетке двести пятьдесят шесть в кубе, это больше 16 миллионов ячеек.

Следующие два слайда содержат ряд положений, характеризующих новизну предлагаемого исследования. Впервые показана возможность изменения выпуклости стационарного профиля скорости, если говорить о каких-то математических новшествах, то предложено дополнительное ветвление алгоритма КАБАРЕ для более корректного расчета в случае застойных зон.

Кроме того, есть часть положений, связанных с валидацией численного метода, моделированием течения Тейлора-Грина, для которого были получены взаимные корреляции квадрата завихренности и пульсационных компонент давления. Кроме того, было показано, что при эволюции двойного вихревого слоя в случае слабосжимаемой жидкости вклад компоненты дилатации, то есть связанной с пульсациями, с сжимаемостью сопоставим с общей диссипацией. Также было проведено моделирование плоского течения $\langle \theta \rangle$ КАБАРЕ, показано, что процесс смешения, то есть крупномасштабного захвата слоёв жидкости, оказывается наиболее интенсивным в окрестности точки перегиба

Для слоистого течения было показано, был найден... теоретически подтверждено существование безразмерного комплекса, в состав которого входит число Рейнольдса и отношение вязкостей в различных слоях, которое однозначно определяет интенсивность процесса смешения. Ну и впервые проведено численное моделирование эволюции течения термовязкой жидкости в трехмерном слое под воздействием хаотических возмущений.

На данном слайде представлены основные положения, выносимые на защиту. Я думаю, что зачитывать их не стоит. На этом у меня все. Уважаемые члены совета, если есть какие-либо вопросы, я с удовольствием на них отвечу.

Председатель

Спасибо, Юрий Матвеевич, за то, что уложились в отведенное время. Есть возможность задать вопросы соискателю.

Шугаев Ф.В.

Скажите, пожалуйста, возмущения, которые вы исследовали, они были заранее заданы или они появлялись в процессе решения.

Куликов Ю.М.

Все возмущения, которые рассматривались в данных задачах, являются изначально заданными, потому что, в отличие от лабораторных или естественных условий, когда у нас всегда присутствуют какие-либо мелкомасштабные возмущения, в численных задачах, если схема устойчива, то возмущения не должны приводить к возмущению основного течения, поэтому здесь мы всегда задаем возмущения поперечной скорости, отличие может быть только в их амплитуде. По крайней мере, они должны быть мало амплитудными для изучения задач устойчивости.

Председатель

Спасибо, еще, пожалуйста, вопросы. Такой вопрос: для неспециалистов в области турбулентности прозвучало много интересных новых терминов, сложных словосочетаний. Вот у вас нигде не было сравнения с экспериментальными данными. Что ваша работа дает для практики, так вот на уровне, чтобы попроще объяснить.

Куликов Ю.М.

С практической точки зрения... Поскольку наиболее интенсивно развивающейся областью гидродинамики сейчас является вычислительная гидродинамика. То здесь следует выделить два практических аспекта, первый практический аспект связан применением численного метода КАБАРЕ, потому что очень много исследований по нему. Скажем так, достаточное количество публикаций.

А второй аспект, практический, является..., с точки зрения механики термовязкой жидкости. Если говорить о втором аспекте, то, несомненно указание на важность учета температурной зависимости вязкости в экспериментальных и численных исследованиях. То есть, когда проводится тестовое моделирование, в частности, моделирование маслонеполненных трансформаторов. Мой личный опыт показывает, что часто задаются либо две реперные точки, либо задается постоянная вязкость. Вторым аспектом является то, что подобная зависимость может не просто изменить какие-то характеристики стационарного течения, но может радикально привести к изменению структуры потока, что может привести, в свою очередь, к образованию слоистой турбулентности. Слоистая турбулентность, то есть тот случай, когда у горячей стенки весь поток турбулизированный, а у нижней стенки течение ламинаризованное, — радикально влияет на характеристики теплообмена между двумя пластинами. Соответственно данное явление может привести к существенному изменению теплопереноса даже в таких простых задачах.

Председатель

Так, спасибо, дальше, пожалуйста, вопросы.

Кобзев Г.А.

Скажите нам, не все из нас являются крупными специалистами в рассматриваемой области, что мы могли запомнить наиболее яркое, что вам нравится больше всего, какой результат.

Куликов Ю.М.

Больше всего в этой работе мне нравится результат, связанный со второй задачей. Это слоистое течение, с численной точки зрения она достаточно простая. Здесь у нас есть сдвиговое течение, а вторая часть вообще полностью заторможена. По крайней мере, на

тех работах... те работы, на которые я опирался, в основном они иностранные. Там также рассматривалась толщина потери импульса дельта, но почему-то нигде такая простая аналогия с асимптотиками свободного пограничного слоя, она почему-то нигде не была найдена.

Хотя после решения интуитивно понятно, что это просто свободный пограничный слой, который имеет большое число аналогий, то есть имеет большую историю изучения и важность, что данный процесс описывается универсальным образом, одним всего лишь параметром. То есть при его увеличении до катэ четыреста процесс смещения полностью подавляется. Какие бы возмущения мы не вносили. Собственно, это тоже является связью с экспериментальной практикой, потому что реальные условия экспериментов для термовязкой жидкости, они достаточно сложны. Потому что многие из них типа индустриальных масел являются непрозрачными, их очень трудно наблюдать. Возможно, с помощью методов... с помощью ультразвуковых методов. И, кроме того, необходимо поддерживать стационарный режим на большой длине канала. Потому что, если мы обратим внимание, то характерные времена расчета процесса эволюции течения, — они очень большие. То есть, если говорить более определенно, то поток за это время протекает 120 калибров.

Председатель

В секундах?

Куликов Ю.М.

Это безразмерное время, условно среднemasсовая скорость порядка полуметра в секунду, и кубик порядка 20 сантиметров. Ну вот, 120 калибров кубик должен... <вмещаться>. Поэтому данная временная зависимость может легко <быть> преобразована в пространственную. Поэтому это означает, что для моделирования ... для экспериментов с такими течениями нужны достаточно большие трубы с четко выдержанным тепловым режимом.

Председатель

Валерий Федорович, пожалуйста.

Чиннов В.Ф.

Юрий Матвеевич, скажите, пожалуйста: отсутствие сравнения с экспериментами или другими расчетами, означает ли это, что большинство полученных вами результатов является новыми?

Куликов Ю.М.

Да, большинство полученных является новыми, но, тем не менее, хотел бы уточнить, что в русле феноменологических зависимостей у нас наблюдается полное совпадение с результатами Кэмбелла и Тёрнера. Существование такого безразмерного параметра, оно подтверждено теоретически, по крайней мере, в их экспериментах данный вопрос подробно не обсуждается.

Вот, здесь стоит обратить внимание на то, что здесь проводилось сравнение с результатами других численных экспериментов. Однако это проводилось для изотермических течений. У меня есть достаточное количество материала, которое не вошло в основное выступление.

Связано, это, например, с моделированием плоского слоя. Эта задача является хорошо известной с точки зрения вычислительной гидродинамики. Здесь моделируется распад двойного вихревого слоя. Здесь представлены как раз значения завихренности, то есть это ротор скорости. Ну, а в левой части слайда представлена постановка задачи. Собственно, я использовал её как основу для моделирования слоистого течения. Здесь верхний слой движется справа налево, а нижний слева направо. Аналогичным образом задаются гармонические возмущения.

Важно отметить, что скорость роста данных возмущений, то есть инкремент неустойчивости данного возмущения зависит от... здесь, правда, альфа обозначает волновое число, но на самом деле здесь ка надо поставить. В частности, здесь приведено сравнение численного метода КАБАРЕ с результатами работы Сэндхема, на которые я уже ссылался, а также с методом девятого порядка точности, это операторный метод, разработанный Толстых. В диапазоне точности, определяемой приближением слабой

сжимаемости, то есть число Маха в квадрате порядка одного процента, мы получаем достаточно убедительное совпадение. Кроме того, второй канонической задачей является моделирование течения Тейлора–Грина. Ему также посвящено большое количество работ. Задача сформулирована в 37 году. Изначально решалась методом последовательных приближений, вот третье приближение содержит 518 членов. То есть может моделироваться только численно, по крайней мере, на дальних временах эволюции.

Ну, здесь у нас имеется случай ламинарного распада, случай турбулентного распада. И на следующем слайде будет приведено сравнение с другими численными методами, то есть мы предварительно провели достаточно подробное тестирование, выбрав те задачи, которые отличаются развитыми вихревым полем. Потому что в задачах смешения, отображение вихрей является очень важным. Поэтому с точки зрения численных методов у нас достаточно подробное сравнение.

Председатель

Так, Станислав Александрович, пожалуйста.

Медин С.А.

Скажите, пожалуйста, с какой целью вы были вынуждены модифицировать метод КАБАРЕ, и насколько расширилась возможность уже вашего метода по спектру физических задач.

Куликов Ю.М.

Ну, в данном случае основной мой вклад с точки зрения вычислительной гидродинамики заключается в расширении опыта использования приближения слабой сжимаемости. То есть у Василия Михайловича есть отдельный раздел, весьма краткий, посвященный данному приближению, оно позволяет частично упростить алгоритм расчета и избавиться от решения уравнения Лапласа давления. С точки зрения численных исследований, приближение слабой сжимаемости, которое можно посмотреть... которое является новым с точки зрения вычислительной практики. То есть, например, в классическом случае скорость, например, диссипации является непрерывной, то есть монотонной функцией, спадающей.

Сжимаемость дает свой существенный вклад. Вследствие малой диссипативности схемы у нас еще накладываются такие вот акустические осцилляции, которые не зависят от рассматриваемого числа ячеек расчетной сетки. Поэтому, с точки зрения внедрения и использования, мой вклад заключается в этом. Кроме того, еще дополню, есть... частично изменено ветвление алгоритма связанное с обработкой точек, где не происходит никакого движения. То есть там переменные остаются неизменными и дополнительных расчетов никаких не производится. Это позволяет избавиться от паразитных тепловых волн.

Председатель

Спасибо, Анатолий Фомич, вам слово.

Поляков А.Ф.

Вы рассматривали случай течения вязкой жидкости в плоском канале, в частности.

Куликов Ю.М.

Да, этому была посвящена первая задача. То есть, это плоское напорное течение. Давайте еще раз на него посмотрим.

Поляков А.Ф.

Меня тогда интересует значение чисел Рейнольдса перехода к турбулентности.

Куликов Ю.М.

Да, спасибо. Это очень интересный вопрос, потому что в силу резкого изменения вязкости определение числа Рейнольдса представляет большой интерес. Потому что мы число Рейнольдса можем определять совершенно различным образом, во-первых, это среднemasсовое число Рейнольдса, то есть, когда у нас есть среднemasсовая скорость,

среднемассовая вязкость.

Вот в последней задаче, там используется исключительно среднемассовое число Рейнольдса. поэтому число Рейнольдса там получается порядка тысяча пятьсот — тысяча шестьсот перехода. В случае с первой задачей, я подобрал специально такой режим, чтобы любое из трех чисел Рейнольдса, которые определяются по среднемассовому значению... То есть, число Рейнольдса первое это вот как раз среднемассовое. Также есть еще число Рейнольдса, которое определяется по переменной вязкости, но я специально добрал такой режим, чтобы в окрестности точки перегиба, которая представляет наиболее сильный интерес, все эти значения приходились приблизительно на две триста.

То есть, в окрестности точки перегиба у нас число Рейнольдса, соответствующее ламинарно-турбулентному переходу. Важно подчеркнуть, что возмущения развиваются именно здесь, а не в ядре потока, и не в горячем пристенке, наиболее сильным образом. Хотя, казалось бы, там число Рейнольдса, особенно, если определять его по вязкости у горячей стенки, где оно самое маленькое, там должно быть самое большое. Однако наиболее ярко выраженное возмущение и захват слоев жидкости происходит в окрестности точки перегиба.

Председатель

Спасибо еще вопросы, или, может, достаточно уже.

Попель О.С.

Достаточно уже.

Председатель

Тогда слово предоставляется... Юрий Матвеевич, вы можете присесть. Слово предоставляется научному руководителю, академику Эдуарду Евгеньевичу Сону.

Сон Э.Е.

Уважаемые члены совета! Я с Юрой Куликовым работаю, начиная с четвертого курса. Хотелось бы несколько слов сказать о его деятельности, поскольку это человек неординарный. Начать с того, что он прошел весь курс обучения Физтеха, внимательно прослушав и усвоив хорошо математику, физику, вычислительную математику и так далее, он был готов вполне к тому, чтобы начать... первые работы, которые мы начали с ним делать, эти работы касались плазмы и после этого... Я хотел сказать так: есть ряд работ, которые выполнены им, но они в диссертацию не вошли. Самые такие результаты, наиболее интересные, это моделирование... Вязкость меняется, зависит резко от температуры, от давления не только в термовязкой жидкости, но и в плазме, например.

В плазме известно, что есть горячая струя, но в канале у вас холодная стенка — поперек вязкость меняется очень сильно, поэтому не обходимо было рассчитывать плазмотроны. И вот здесь есть Гаджиев, потом Тюфтяев, которые занимаются плазмотронами. В канале плазмотрона температура достигает ста тысяч градусов, в ядре, поэтому перепад температур очень большой.

Во-первых, оказалось, что по термодинамическим свойствам азота таких данных ни в ИВТАНТЕРМО, нигде нет, и все данные при высоких температурах расходятся, включая эксперименты Асиновского и многих, многих других. Поэтому он <соискатель> сделал большую ревизию и провел анализ расчета состава и вязкости, плазмотрон рассчитал он полностью. То есть это его заслуга была.

Работа, которая предлагается сейчас... возникла пять лет назад. Вы знаете, что каждые пять лет у нас в России проходит съезд по механике. В этом году съезд по механике будет в Уфе, там имеется несколько секций, в том числе и симпозиум по комплексным течениям, где эти работы также представлены.

Пять лет назад был такой же симпозиум, но проходил в городе Казани. И я посетил этот симпозиум, послушал доклад Урманчеева Саида. Его доклад был посвящен термовязким течениям, но он был посвящен другому классу течений, и тогда возникла идея, что объект, термовязкая жидкость, этот настолько уникален, что есть возможность проверить классику. А классика — это что? Известная теорема Релея. Известно, что есть необходимое, а есть достаточное условие. Необходимое условие говорит о чем. Что если течение неустойчиво, то у него есть точка перегиба. И эта теорема доказывается. А вот достаточного условия нет. И поэтому возникал вопрос.

Это во-первых. Во-вторых, теорема Релея относится к идеальным жидкостям. Поэтому, вот как обосновать, это вопрос принципиальный с точки зрения гидродинамики.

Поэтому, послушав доклад Урманчеева, мы на кафедре обсудили с Юрой и решили рассмотреть такой случай, когда течение слоистое. Но если нижняя стенка греется, а верхняя холодная, то это ситуация, которая приводит к конвекции, она малоинтересна.

Поэтому рассмотрели другую ситуацию, когда верхняя стенка горячая, а нижняя холодная и тогда оказывается так: известно, что число Рейнольдса перехода в трубе это 2300. Возьмем число Рейнольдса сто, это явно ламинарное течение, у холодной стенки. Теперь, если мы возьмем у верхней стенки температуру 80 градусов Цельсия, на 80 градусов больше, то термовязкая жидкость обладает свойством таким... кухонная физика так называемая. Если мы возьмемте сковородку, нальете масло в нее. Если вы её начнете поворачивать, то масло будет медленно стекать, если вы его немножко подогреете, то оно станет «более жидким», как говорят.

Кобзев Г.А.

Эдуард Евгеньевич! Это вы нам уже содержание диссертации рассказываете.

Сон Э.Е.

Я хотел сказать, что вот это явление оказалось крайне интересным, и поэтому часть работы, которая не вошла в диссертацию, она связана с тем что, Юре Куликову была поставлена задача создать экспериментальную установку. И такую экспериментальную установку он создал. Она существует, она представлена на конференциях. Но возникло две проблемы, связанные с тем, что установление течения вдоль оказалось очень длинным. То есть установку, которую следующей нужно было бы делать, она была бы длиной десять метров. Это первая проблема.

Вторая проблема была связанна с тем, что надо было подбирать вещества так, чтобы процесс стабилизировался, и тогда мы решили эти работы продолжить, но немного в другом варианте... Экспериментальная установка есть, есть фотографии. Он не захотел включать это в диссертацию по первой причине, и, второе, сложная диагностика, хотя была поставлена ультразвуковая диагностика и другие.

Я хотел сказать так, что есть ученые, молодые, и не очень молодые, они делятся на две группы — одни экспериментаторы, а вторые теоретики, хотя каждый экспериментатор владеет, конечно, теоретическими методами, каждый теоретик владеет экспериментальными методами. Но есть один пример человека, не знаю, знаете ли вы или нет... Для меня пример человека, который сначала был очень хорошим экспериментатором, а потом стал хорошим теоретиком. Этот человек — Ричард Фейнман.

Знаете ли вы, что технологии нанесения металлов на керамику — это изобрел Фейнман лично. И когда он это рассказывал другим, он говорил, что это сделала не большая лаборатория, он сделал это один. Полностью. Все до конечного продукта.

Поэтому Юра Куликов, сделал все своими руками, сделал всю эту установку, и мне казалось, что он пойдет по пути экспериментальных работ, но когда потребовалось эту установку рассчитать, тут он взял Комсол, те программные пакеты, которые были в руках и у него не получилось.

И после этого возникло предположение, что надо более точным численным методом считать. И тут когда мы стали думать, какой метод, то быстро выяснили, что метод КАБАРЕ... Вообще, в численных программах есть проблема численной вязкости, которая всегда есть, так вот рекордсменом по наименьшей численной вязкости является метод КАБАРЕ, который был сделан в школе Самарского.

Головизнин, который должен был быть здесь, он тридцать лет делал этот метод. И он его сделал только для Навье–Стокса, для гидродинамики. Вот тут задавался вопрос по поводу того, что нового сделано, не это главное он <соискатель> сделал, а главное то, что КАБАРЕ Головизниным и учениками Головизнина применялся для задач чисто гидродинамических, то есть при постоянной температуре. А у него — термовязкая жидкость, поэтому нужно было метод КАБАРЕ разработать, включив еще одно уравнение — уравнение энергии. Что, собственно, и было сделано, поэтому, начав эту часть работы, он в неё настолько углубился, что представил работу, в которой проведены расчетно-теоретические работы очень высокого уровня.

Уже после представления работы в совет, сделано три работы, публикации в журналах, которые определяют другое важное направление турбулентности в поле объемных сил и переменных величин. Головизнин, которого нет сегодня по объективным причинам, он мне вчера позвонил, сказал, что «я, к сожалению, не могу», и сказал, что «это настолько сильный парень, что я хотел бы с ним работать».

Ну, а что получилось...

Из моих учеников, не в обиду моим другим ученикам, он входит в число лучших, я бы даже сказал в тройку лучших, работой которых я доволен. И я думаю, что у него большие перспективы в будущем. Он и хорошо знает эксперимент в самых разных областях, умеет экспериментировать.

Ну а в теории, этой области равных ему во всем мире нет. Потому что все работы публиковались в очень серьезных журналах. Могу сказать, что каждая публикация Веб-оф-Саенс хорошего уровня, она требовала... раз пять референты делали замечания,

замечания. Они исправлялись, и, в конце концов, были приняты. Поэтому умение работать со статьями, направленными в печать это очень показательно, потому, что он умеет правильно отвечать на вопросы, которые ему задают.

Вам судить, что получилось. Спасибо.

Да, еще я забыл одну вещь сказать. Я вот тут приготовил. Знаете ли вы, что та проблема, о которой я только сказал. Это фундаментальная проблема о точке перегиба, и здесь задавался вопрос абсолютно правильный.

Это первый вопрос был о том, что искусственно вводились возмущения или не вводились. Известно, что в механике... Если карандаш стоит вот так, то теоретически – это устойчивое состояние, потому что сила тяжести равна силе реакции... Но малые возмущения, они приводят к тому, что в теории нужно обязательно вводить...

А идея состояла в том, что поскольку точка перегиба является генератором всего, то вводить нужно в этой точке, а спектр должен быть такой, который по линейной теории, по Орру-Зоммерфельду, дает самые большие инкременты. Поэтому мы знаем, что и куда вводить. Потому что другие люди, экспериментаторы, не вводят возмущения, получают ответы, сравниваются с теорией, а у них не получается, потому что они не те возмущения очень часто вводят.

Так вот, эта проблема возникновения неустойчивости, она на самом деле восходит к еще более ранней теореме Эйлера. Был такой математик Арнольд, известный, эта задача восходит к еще более ранней задаче. Я специально взял коробок, у нас как-то принято на Ученом совете показывать эксперименты. Проведите сами такой эксперимент, возьмите коробок, или пачку сигарет, или коробок спичек. У этого коробка есть три стороны. Три стороны должны быть разными. У него есть три оси, одна из осей происходит через наибольшую площадь, вторая из осей происходит через наименьшую, и третья происходит через среднюю.

Так вот оказывается, что теорема Эйлера, которую Гельфанд доказал, а потом показал, что на связана с теоремой Эйлера для устойчивости идеальной жидкости. Если вы закрутите коробок вот так, он будет падать, не меняя своей ориентации, если вы закрутите вокруг самого узкого сечений, он тоже будет устойчив, а вот если, вы его будете его крутить вокруг средней оси, которая не самая большая, такое течение является неустойчивым. Так вот эта задача — аналог неустойчивости в задаче Эйлера, которую он решал. Вот эта задача, она принципиальна, потому что, это — принципиальное решение задачи, как возникает неустойчивость. Достаточное условие, но в случае даже вязкой жидкости. Все. Спасибо.

Председатель

Попросим Ученого секретаря огласить заключение организации, где выполнялась работа, отзыв ведущей организации, это Санкт-Петербургский политехнический университет имени Петра Великого и другие. Их поступило очень много, где-то тринадцать отзывов на автореферат диссертации, поэтому просьба быть максимально лаконичным, насколько это возможно.

Ученый секретарь

Отзыв ведущей организации подробно зачитывать я не буду, лишь только хочу сказать, что здесь отражены все формальные требования, которые должны быть в этом отзыве, содержание глав диссертации. Я остановлюсь только на замечаниях:

<первое замечание> «Во второй главе диссертации приводится два способа вывода обобщенного уравнения Орра-Зоммерфельда, записываемого относительно амплитуды функции тока возмущения. При этом автор отталкивается от одного и того же уравнения для амплитудной функции возмущения скорости. В результате, однако, автор получает уравнения с отличающимся видом слагаемых, обусловленных зависимостью вязкости от температуры. Причина полученных расхождений не указывается.»

Второе замечание: «При постановке задачи линейной устойчивости течения термовязкой жидкости в плоскопараллельном канале, сводящейся к решению обобщенного уравнения Орра-Зоммерфельда, автор исходно пренебрегает пульсациями температуры, приводящими к пульсациям коэффициента вязкости. Это допущение оправдано для жидкостей с малым числом Прандтля, когда флуктуации температуры быстро рассеиваются. Для случая больших чисел Прандтля, что типично, например, для трансформаторных масел, данное приближение может приводить к существенным погрешностям в определении числа Рейнольдса.»

Третье замечание: «Описанная в главе 3 реализация схемы КАБАРЕ предназначена для численного решения уравнения Навье-Стокса в случае движения слабосжимаемой жидкости. Однако не поясняется, с какой целью требуется введение фактора сжимаемости среды, и как это может повлиять на результаты изучения процессов

развития неустойчивостей и турбулентности в рассматриваемых течениях термовязких жидкостей, практически несжимаемых в реальных условиях.»

Четвертое замечание: «Не слишком удачным является выбор кубической расчетной области для прямого численного моделирования напорного течения термовязкой жидкости, подверженного в начальных момент воздействия трехмерных случайных возмущений. Известно, например, что «каноническое» турбулентное течение изотермической несжимаемой жидкости в плоскопараллельном канале характеризуется наличием удлинённых продольных вихрей, и для адекватного воспроизводства роли этих образований в расчетах по методу DNS требуется задание длины и ширины расчетной области, кратно превышающих расстояние между стенками. В любом случае, следовало бы дать обоснование сделанного выбора.»

Пятое замечание: «Для той же задачи автор утверждает, в частности, что (п. 5.3.15) «при относительно небольших среднемассовых числах Рейнольдса» реализуется режим течения, который связан с перестройкой неустойчивого ламинарного профиля под воздействием трёхмерных возмущений в профиль без точки перегиба, отличающийся более высокими расходными характеристиками.» Справедливость данного утверждения вызывает большое сомнение, поскольку наложение возмущений приводит к росту эффективной вязкости и как следствие, к увеличению суммарного трения о стенки, что при фиксированном продольном перепаде давления может приводить только к уменьшению расхода. Судя по всему, предписываемый в начальный момент «неустойчивый ламинарный профиль» не был в достаточной мере согласован с продольным перепадом давления и/или значением параметра α , задаваемых при проведении трехмерных расчетов. Подчеркнем, что данное замечание не затрагивает полученных оценок критического числа Рейнольдса перехода к режиму с развивающейся во времени турбулентностью и результатам её численного моделирования.»

Шестое: «Текст диссертации излишне многословен, перегружен рассуждениями общего характера. Нередко затрагиваются вопросы, не имеющие непосредственного отношения к тематике проведенного исследования. Например, непропорционально большое время уделяется истории развития методов исследования турбулентных течений, начиная от опытов числа Рейнольдса. Зачем-то дается формулировка одного из вариантов полуэмпирической k - ϵ модели турбулентности и т.д. В то же время исходные предпосылки к рассмотрению выбранных модельных задач и детали постановок описаны, как правило, весьма скудно.»

И последнее: «В тексте имеется большое число опечаток, а также стилистических погрешностей.»

Ну и некий вывод: «Замечания относятся, в основном, к представлению материала на страницах диссертации и не меняют общего положительного впечатления о выполненной <Ю.М.> Куликовым работе, которая представляет собой завершенное научное исследование, актуальное по тематике, целям и задачам, и содержит ряд новых научных результатов, имеющих также практическое значение. Работа прошла широкую апробацию в российских и международных конференциях, основные результаты опубликованы в научных изданиях из перечня ВАК. Автореферат диссертации достаточно полно отражает её содержание. Таким образом, можно констатировать, что **работа Куликова <Ю.М.> удовлетворяет пунктам девять, десять Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а её автор Куликов Юрий Матвеевич заслуживает присуждения** ему ученой степени кандидата физ.-мат. наук по специальности ноль один ноль два ноль пять — механика жидкости газа и плазмы.

Отзыв составлен Смирновым Евгением Михайловичем, заведующим кафедрой "Гидроаэродинамика, горение и теплообмен" Санкт-Петербургского университета Петра Великого и Смирновским Александром Андреевичем, доцентом той же кафедры, и утвержден проректором по научной работе членом-корреспондентом РАН Сергеевым.

<отзывы на автореферат>

<первый отзыв> Отзыв от **Журина Сергея Викторовича** от НПО РКК Энергия имени Королева. Отзыв положительный, замечания: «в автореферате явно не отражено сопоставление результатов численных исследований с экспериментальными данными» и второе замечание: «каким образом полученные результаты могут использоваться в практических задачах.»

<второй отзыв> Отзыв **ГРЦ Макеева**, составлен доктором физ.-мат. наук, доцентом, главным научным сотрудником **Мокиным Юрием Александровичем**.

Отзыв положительный, замечания: «В качестве замечания к автореферату отметим следующее: в материалах автореферата указано, что при моделировании течения ТВЖ в различных разделах работы использовались две различные модели возмущений — комбинированные слабые гармонические возмущения и случайные хаотические,

характеризуемые длиной корреляции. Поскольку не указан второй объект корреляционной связи, то, по-видимому, речь идет об автокорреляции.

В материалах автореферата слабо отражены условия, факторы и предпосылки реализации того или иного типа возмущений. Кроме того было интересно рассмотреть вопрос о характере влияния суперпозиции гармонических возмущений. В частности имеет ли место при этом, в каком-либо смысле свойство линейности.»

<третий отзыв> Так, следующий отзыв **Мулладжанова Рустама Ильхамовича, Новосибирск, Институт Теплофизики**. Отзыв положительный, замечания: «кажется странным, что зависимость ошибки численного решения уравнения Орра–Зоммерфельда при увеличении числа полиномов Чебышева монотонно растет при эн больше семидесяти. В автореферате это приводится без соответствующих пояснений.»

Второе замечание: «На рисунке два-бэ, показаны кривые нейтральной устойчивости для различных значений параметра альфа в плоскости ка-Рейнольдс. Логичным было бы привести сравнение, начиная с малых альфа, со случаем классического плоского течения Пуазейля.

Третье: «Последние двадцать лет существенно развита немодальная теория устойчивости, которая, в частности, дает объяснение, почему ламинарно-турбулентный переход происходит раньше в плоском канале, чем предсказывает уравнение Орра-Зоммерфельда и анализ наиболее неустойчивой моды, а также ламинарно-турбулентный переход в круглой трубе, — этот вопрос в автореферате не отражен.»

Червертое: «Является ли развитие численных методов предметом для отдельной содержательной главы (глава 4), по которой должны быть сделаны выводы о физике рассматриваемых процессов? Кажется, что уместнее было бы включить это описание в первую главу, где описаны методы и подходы. В главе пять нет описания, что такое зет-тэ диаграммы.»

<четвертый отзыв> Отзыв **Аксенова Андрея Александровича, ООО «Тесис» Курсакова**, замечания: «В качестве замечания к автореферату необходимо сказать, что автор не привел сравнения расчетов с экспериментальными данными и данными других авторов, однако, практически все расчеты выполнены с исследованием сходимости по расчетной сетке. Также необходимо было бы привести обычные тесты расчетной схемы на наличие свойств монотонности и транспортности, как выполнено во многих работах Леонарда и Гартена (одномерное движение с постоянной скоростью, уступ, полусинус, полусфера и так далее.)»

<пятый отзыв> Отзыв, подписанный **Чирковым Алексеем Юрьевичем, Бауманский университет**, одно замечание: «желательно было более подробно, чем это сделано на странице одиннадцать, описать систему уравнений, решаемых численно по схеме Кабаре, включая подход к описанию турбулентности, а также уделить немного больше внимания механизму численной диссипации в схеме Кабаре применительно к условиям решаемых задач. Указанное замечание не влияет на общее положительное...» ну и так далее.

<шестой отзыв> **Центр Келдыша**, отзыв доктора физ.-мат. наук **Черкасова Сергея Гелиевича**. Одно замечание: «В качестве замечания надо отметить, что для некоторых термовязких жидкостей характерна немонотонная зависимость коэффициента вязкости от температуры, однако, этот случай, судя по автореферату, в диссертации не рассматривался.»

<седьмой отзыв> Отзыв из **ЦНИИМаш**, **Шманенков Валерий Николаевич и Ковалев Роман Вячеславович**. Замечания: «Недостаточно полно описан алгоритм численного счета для решения задач о течении вязкой теплопроводной жидкости при проявлении немонотонных свойств и специфических условий.»

<восьмой отзыв> Отзыв **Знаменской Ирины Александровны, МГУ, Физический факультет**. <Замечания:> «На стр. 9 автореферата: «Уравнения Навье–Стокса для стационарного течения несжимаемой жидкости сводятся к параболизированному уравнению». По-видимому, имеется в виду — к параболическому уравнению.»

«На стр. 11 автореферата: «Сформулированы периодические граничные условия, сохраняющие перепад давления в расчётной области в направлении периодичности», следует ли это понимать как граничные условия для инвариантов, обеспечивающие перепад давления?»

И последнее: «Из автореферата можно понять, что результаты исследования не сравнивались с экспериментальными данными, желательно было бы сравнить.»

<девятый отзыв> Отзыв **Жмура Владимира Владимировича, Институт океанологии Ширшова**. отзыв положительный, без замечаний.

<десятый отзыв> **Институт проблем химической физики, Султанов Валерий Гулямович**, отзыв положительный, без замечаний.

<одиннадцатый отзыв> Отзыв **Центр Келдыша <ИПМ им. М.В. Келдыша>, Змитренко Николай Васильевич**, отзыв положительный, без замечаний.

<двенадцатый отзыв> **Казанский Федеральный Университет**, отзыв профессора **Кашапова Наиля Фаиковича**, замечания: «При учете зависимости вязкости от температуры недостаточное внимание уделено пристеночным областям, так, например, в объемах жидкости, имеющих относительно протяженную свободную поверхность и малый вертикальный размер – таких, как тонкие горизонтальные слои и пленки жидкости, объемные силы оказываются малы по сравнению с поверхностными. В этих случаях конвективное течение Марангони, возникающее в жидких средах вблизи поверхности раздела фаз, может быть обусловлено наличием вдоль поверхности градиента температуры и способно вносить существенный вклад в процессы тепло/массообмена, а также влиять на форму свободной поверхности, вызывая поверхностные деформации и даже перемещения всего объема жидкости в целом. Межфазная конвекция существенно влияет на интенсивность многих технологических процессов в пищевой, химической, нефтяной, металлургической и других отраслях промышленности.»

<тринадцатый отзыв > Отзыв доктора наук **Тукмакова Алексея Львовича**, **Казанский технический университет**, отзыв положительный, без замечаний. Всё.

Председатель

Спасибо, Леонид Бенцианович, там поправка единственно, что из Центра Келдыша был один отзыв, а второй – из Института прикладной математики имени Келдыша. Юрий Матвеевич, теперь вам предоставляется слово для ответа на отзывы ведущей организации, и на все отзывы, которые поступили на автореферат. Но обычная просьба, лаконично... может, как-то сгруппировать, и то, что не вошло в автореферат – вошло в диссертацию, поэтому используйте это преимущество.

Куликов Ю.М.

Да, я понял. Спасибо. Наверное, нужно начать с главного. В принципе, я со всеми замечаниями согласен, если не по форме, то по существу. Однако нужно сделать несколько замечаний, в частности, касательно отзыва ведущей организации, он достаточно подробный, замечания развернутые.

Мне замечания зачитывать?

Попель О.С.

Нет

Куликов Ю.М.

Ну, в частности, было замечание, связанное с выводом уравнения Ора-Зоммерфельда, не приведено сравнение. Я с ним согласен. Наиболее кратко охарактеризовать сложившуюся ситуацию так: существует метод вывода, применяемый в пермской школе, когда применяется операция двойного ротора, аналогом его является применение сначала дивергенции, потом градиента, и потом исключение давления. В данном случае мы получаем уравнения для возмущений скорости. Другое уравнение, которое приводится, в частности, в книгах Дразина, связано с уравнением для возмущения функции тока. Однако процесс его получения не связан с выполнением операции двойного ротора. Там рассматривается система из двух уравнений для возмущений. А затем дважды вводится предположение о том, что функция имеет вид, представляет собой, совокупность бегущих волн.

Сначала возмущения скорости, потом функция тока. Таким образом, причиной расхождения вида уравнений является использование различных дифференциальных операторов. Соответственно, в первом итоговом уравнении была некорректно выполнена замена переменных возмущения поперечной скорости на функцию тока. Однако, данная замена является некорректной, так как в данном случае, у нас отсутствует дифференциальная связь со второй компонентой скорости. Кроме того, не совсем понятно, почему уравнения для первообразной (функции тока) и возмущений скорости должны совпадать.

Следует отметить, что различия касаются только той части, в которой содержится термовязкий параметр альфа. Таким образом, у нас две причины расхождений. Однако, нужно сказать, что второе уравнение для возмущений функции тока, – оно никак не решалось и, вообще, для него не так много численных решений, поэтому на основные выводы, которые были получены на основе возмущений скорости, оно никак не влияет.

Второе замечание связано с выбором характера возмущений для решения задачи устойчивости. Действительно, в данном случае мы рассматриваем только возмущения для скорости и давления, то есть классическую волну Толмина–Шлихтинга.

С математической точки зрения более полный подход действительно должен

предусматривать возмущение температурного поля. Здесь можно выдвинуть два аргумента. Во-первых, изначально мы рассматривали такое распределение температуры, когда у нас перепад температур является достаточно малой величиной по сравнению с реперной температурой. Поэтому, соответственно, возмущения скорости являются фактически возмущениями второго порядка малости.

Более серьезный аргумент заключается в том, что подобные течения рассматривались в работах девяностых годов. В частности, там рассматривалась сцепленная система уравнений для возмущений скорости и температуры, и в работе Вилсона. Собственно, это было подмечено в работах индийских исследователей Рамы Говиндарааян, она сейчас является наиболее авторитетным специалистом в мире в этой области. <Ими> указывается, что в уравнении для возмущений температуры изменение числа Пекле в диапазоне от нуля до десяти в пятой приводит к конечному изменению характеристик устойчивости менее, <чем> на два процента, поэтому в данном случае возмущение температуры существенного влияния на процесс устойчивости в термовязкой жидкости не окажет.

Третье замечание связано с использованием приближения слабой сжимаемости, возможно, его возникновение связано с не совсем удачным расположением данной главы диссертации. Однако в исследовании указывается, в частности, в разделе три-два: «приближение слабой сжимаемости представляет собой промежуточную модель, позволяющую упростить алгоритм отбора значений локальных инвариантов, а также избежать решения уравнения Лапласа для давления».

Дополнительные соображения можно почерпнуть в монографии Головизнина Василия Михайловича, там достаточно подробно изложено все. По крайней мере, основной алгоритм и его вариации. Кроме того в подразделе 4.2.1 — Постановка задачи указано: «Для достижения общности... используется несколько безразмерных параметров, в частности, число Маха. Дальше приводятся соображения по выбору числа Маха для обеспечения требуемой точности».

В смысле аналитических оценок влияние сжимаемости среды на развитие неустойчивости не рассматривалось. Однако что касается численных исследований, здесь неоднократно цитировалась работа Сэндхема и Рейнольдса, в которой было четко показано, что влияние сжимаемости связано с уменьшением скорости роста возмущения. То есть величина инкремента неустойчивости падает. Этот факт объясняет затрудненный процесс смешения сверхзвуковых струй.

Кроме того, кроме того в конце диссертации специально приведен раздел, который так и называется — «Замечания о влиянии сжимаемости потока на характеристики турбулентного течения», он является обзорным, там приведены характеристики процесса для сверхзвукового потока, однако, в конце которого приведены мои собственные расчеты модуля скорости диссипации вследствие сжимаемости для трехмерного течения. Может, концентрированного изложения и нет, но во всех задачах мы сжимаемость исследуем.

Четвертое замечание связано с размером расчетной области. Я с ним согласен. Замечу также, что удлиненные продольные вихри носят название «стриков», то есть «прожилки», и могут достигать сорока характерных размеров в трубе, то есть, это либо характерный размер толщины пограничного слоя, либо радиус. Соответственно, в установившемся турбулентном течении возможно существование очень длинных структур, которые требуют соответствующей длины расчетной области. Поэтому мы заранее не знаем, какой размер расчетной области надо брать, чтобы их можно было моделировать. Важно подчеркнуть, что при развитии турбулентности существенную роль начнет играть поперечный размер, потому что развитие турбулентности приводит к увеличению размера вихрей от начального возмущения. И в данном случае может произойти насыщение масштабов, связанное с тем, что возникновение вихрей более крупного диаметра, более крупного размера, чем размер расчетной области, невозможно. Это сразу сказывается на энергетических характеристиках течения еще до возникновения крупномасштабных структур. Стрики, то есть удлиненные продольные вихри должны наблюдаться в виде неразрешаемого сплошного слоя, в случае, если расчетная область не обладает достаточной длиной. В данном случае этого не наблюдалось.

Попель О.С.

Да достаточно, по-моему, уже.
Вы очень убедительно отвечаете.

Куликов Ю.М.

Здесь есть одно «скандальное» замечание, не совсем понятно, что подразумевает ведущая организация под термином "многословие".

Попель О.С.

Об общих рассуждениях не надо. Достаточно, и так все ясно.

Куликов Ю.М.

Ну, собственно, есть еще замечания по автореферату. Я, в принципе, с ними согласен. Единственное, мне кажется, важно обратить внимание на замечания, связанные с совмещением области устойчивости течения Пуазейля классического и течения термовязкой жидкости. Сравнение, которого не было приведено в данной работе.

Если обратить внимание, то в выражении для безразмерной скорости в знаменателе содержится параметр альфа, который при стремлении альфа к нулю, то есть при исчезновении перепада температур между стенками, будет создавать неопределенность в этом случае. Она может быть раскрыта по правилу Лопиталья. Однако здесь надо предел раскрывать с помощью второй производной. Который позволяет получить предельную функцию при стремлении альфа к нулю. Однако малое значение альфа может оказать существенное <влияние>, то есть привело к ошибочным выводам, что при малых альфа могут возникнуть ошибки при численном решении.

Председатель

Спасибо, Юрий Матвеевич! Переходим к отзывам официальных оппонентов.

Доктор физико-математических наук, **Головизнин Василий Михайлович**, это **Московский государственный университет**, он сегодня не присутствует на заседании, есть соответствующий документ. Это прозвучало, поэтому я обращаюсь к Ученому секретарю <с просьбой зачитать отзыв>

Ученый секретарь

Давайте основными положениями ограничимся.

В начале перечисляется содержание всех пяти глав диссертации и заключение, я и их пропускаю, потому, что практически все есть в автореферате.

Пожалуй, зачитаю:

«В моей интерпретации (оппонента) они <результаты> выглядят следующим образом:» первое, «получена форма скорости при плоском течении термовязкой жидкости, между двумя пластинами, имеющая при определённых параметрах точку перегиба; <второе> получено обобщенное уравнение Орра-Зоммерфельда, для определения линейной устойчивости течения термовязкой жидкости, разработан алгоритм его численного решения, проведен влияния на устойчивость безразмерных параметров задачи;»

Третье, «разработана компьютерная программа, реализующая схему КАБАРЕ.»

Четвертое: «выполнен расчет эволюции гармонических возмущений поперечной скорости в плоском термовязком течении с точкой перегиба, показано, что существование четырех областей течения, в которых возможна активная филаментация турбулентной пелены или длительное существование вихревых структур.»

Пятое, «получена оценка длины установления стационарного профиля скорости ТВЖ в плоском канале как функции безразмерного параметра.»

<Шестое>, «проведено численное моделирование трехмерного турбулентного режимов течения ТВЖ на последовательных расчетных сетках при различных безразмерных параметрах.»

Седьмое, «приведена оценка интегрального масштаба турбулентности в ТВЖ на основе анализа корреляционных функций.»

Дальше отмечается, что работа имеет большую теоретическую и практическую ценность. «Следует отметить прекрасный литературный язык, прекрасную продуманность структуры текста диссертации.»

И замечания, замечание всего одно: «при реализации схемы КАБАРЕ автор использовал аппроксимацию тензора вязких напряжений с первым порядком по времени. Без каких-либо усложнений можно было бы повысить порядок аппроксимации до второго.»

И выводы: «Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям установленным п.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, а её автор, Куликов Юрий Матвеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физ.-мат. наук по специальности механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв оставлен...» ну и так далее.

Председатель

Спасибо, Леонид Бенцианович.

Юрий Матвеевич, тогда просьба ответить на единственный вопрос официального

оппонента.

Куликов Ю.М.

Ну, собственно, я с замечанием согласен. Действительно, можно было, скажем так, лучше реализовать данный этап алгоритма. Однако, на мой взгляд, вклад от повышения точности будет достаточно несущественным в силу того, что у нас работает приближение слабой сжимаемости, которое дает нам однопроцентную точность.

Председатель

Спасибо! Переходим к отзыву второго оппонента.

Доктор физико-математических наук, **Урманчев Саид Федорович**, Институт Механики имени Мавлютова, это **Уфимский научный центр <РАН>**.

Урманчев С.Ф.

Уважаемые Коллеги!

Прежде всего, я хотел бы подчеркнуть, что Юрий Матвеевич представил значительный объем выполненных исследований, в котором есть все, что необходимо для диссертационной работы. И, надо сказать, что этот объем, он выполнен с каким-то значительным запасом. Сам текст читается очень логично. Диссертация, так сказать, очень планомерно и грамотно структурирована, чтение её доставляет определенное удовольствие и с точки зрения получения нового знания.

Еще хотел бы отметить такой аспект. Этот аспект затрагивался в отношении сравнения с экспериментальными работами. Да, действительно, ... оказалось так, что вроде бы и эксперименты и в области тепловых процессов, и в области гидродинамики, — везде все существует. А вот вместе они оказались, эти исследования и их постановка <вызывают> определенные трудности. Там, где это интересно, — высокие температуры нужны. Юрий Матвеевич уже отмечал непрозрачность большинства этих жидкостей. Особенно большое значение они имеют для высоковязких нефтей, для их транспортировки. Вообще, самая первая теоретическая работа, которая была посвящена расчету термовязкой жидкости, еще без введения соответствующих обозначений и более продвинутых идей, естественно. Это работа Лейбензона 1922 года. Где он рассматривал расчет горячего трубопровода. Горячими трубопроводами называются трубопроводы для транспортировки высоковязкой нефти с подогревом. И характеристики подогрева этих ... сейчас все более и более активно занимаются, потому что нефти становятся все более и более сложно добываемыми. Их свойства изучаются... и вот эта работа, она как нельзя кстати для дальнейших расчетов такого рода трубопроводов. Расчетные методики их современные на данный момент отсутствуют.

Теория турбулентности в купе с теорией гидродинамической устойчивости представляют собой необъятный пласт гидродинамики, и, поэтому для развития совершенно необходимым и наиболее интересным и перспективным является развитие модельных представлений о свойствах исследуемых сред, исследуемых жидкостей. Теория термовязких жидкостей она как раз представляет собой такой объект, где, пожалуй, схвачено наиболее важное свойство — это зависимость вязкости от температуры.

Представленная диссертация, как уже говорилось, она состоит пяти глав, заключения, списка литературы, списка рисунков, и, надо сказать, по поводу написания текста диссертации очень важный момент. В диссертации присутствует список сокращений и условных обозначений, что далеко не всегда встречается, диссертанты часто пренебрегают этим моментом. Здесь — такое уважение к тем, кто работает над диссертацией проявлено со стороны автора. Понятно, что во введении охарактеризована сама проблема, первая глава посвящена обзору литературы, который является достаточно ёмким и показательным. С моей точки зрения точки зрения в нем не было ничего лишнего. И он представляет самостоятельную ценность, и может быть издан даже как некое учебное пособие. Еще методы исследования, конечно же, рассмотрены в первой главе. Рабочие главы начинаются со второй главы, где исследуется напорное течение и вопрос его гидродинамической устойчивости.

Надо сказать, что в одномерном приближении было рассмотрено уравнение Навье-Стокса для термовязкой жидкости, и, решая задачу, сведя её к уравнению второго порядка для установившегося течения, автор диссертации установил существование точки перегиба. Был введен параметр экспоненциальный альфа, который в дальнейшем и фигурировал в качестве основного параметра, характеризующего термовязкие свойства жидкости. Здесь очень важно отметить, что была определена длина установления потока функция этого параметра альфа и числа Рейнольдса. Было в дальнейшем представлено решение модифицированного уравнения Орра-Зоммерфельда, в него тоже вошли параметры термовязкости, и решение его было основано на полиномах Чебышева.

Соответствующие исследования, такие интересные, у нас эти тоже проводились.

У нас, с качественной точки зрения, имеется полная корреляция результатов. Получение похожих результатов является признаком их достоверности. Здесь наиболее интересный факт, то, что число Рейнольдса, оно для термовязких жидкостей с изменением показателя термовязкости может уменьшаться достаточно значительно. То есть числа Рейнольдса в несколько раз могут быть уменьшены и глобальное число Рейнольдса может доходить до ста. То есть то, что является в принципе обычным ламинарным течением, для термовязких жидкостей является уже турбулентным или неустойчивым. Третья глава посвящена модификации метода КАБАРЕ, этот вопрос уже сегодня обсуждался, и две главы, — четвертая и пятая, посвящены исследованию процессов смешения. Четвертая глава посвящена вопросам перемешивания в изотермических потоках, а в пятой главе — для термовязких жидкостей.

В каждой главе дополнительное тестирование проводится. Вообще, надо сказать, что автор диссертации, последовательно на каждом этапе проводил тестирование своей программы, прежде чем приступал к расчётам и анализу полученных результатов. Так что, можно сказать, что им применен доказательный численный эксперимент.

Я не буду останавливаться на тех аспектах, на тех результатах, которые были получены в этих двух главах. В пятой главе с двойным слоем была решена задача. И для трехмерного случая течение термовязкой жидкости рассмотрено. И для двухслойного течения установлено семь вариантов развития неустойчивости, перехода к турбулентному режиму. Это сам по себе такой значительный факт, а в области исследования трехмерной задачи оказалось, что тоже такой вот гидродинамический факт есть, что установлено существование двух принципиально отличающихся друг от друга режимов течения. В заключении приведены выводы диссертации. На этом я закончу обзор самой работы и перейду к замечаниям, я их зачитаю.

У меня по работе есть несколько замечаний. Сразу же отмечу, что замечания носят характер требований пояснений к автору, с одной стороны, а с другой стороны — пожеланий, может быть, для дальнейшей работы.

Итак, замечания.

Первое. В работе при выводе обобщенного уравнения Орра-Зоммерфельда возмущения прикладывались к некоторым гидродинамическим параметрам: компонентам вектора скорости и давлению. Каким образом изменятся результаты исследования устойчивости течения ТВЖ при возмущении всех переменных задачи? Какого критерия отбора возмущаемых параметров придерживается автор?

Второе замечание. На рисунке 2.36 не указана нейтральная кривая, соответствующая классическому уравнению Орра-Зоммерфельда. Её изображение могло бы послужить основанием для дополнительных выводов.

Третье замечание. В третьей главе в п 3.3 фактически подробно описан алгоритм расчета течения вязкой слабосжимаемой теплопроводной жидкости в прямоугольной области с использованием схемы КАБАРЕ. Возникает вопрос, почему в названии отмечено «слабосжимаемой нетеплопроводной жидкости»? Это опечатка?

Конечно, это была опечатка.

Четвертое замечание.

В работе установлен важный факт наличия точки перегиба на кривой профиля скорости для термовязких течений, который автором связывается с возникновением неустойчивости течения. Или речь идет об особенностях её возникновения?

Пятое замечание. В чем состоит принципиальное значение точки перегиба при исследовании процессов перемешивания? Можно ли привести физическую интерпретацию влияния точки перегиба на процесс перемешивания и на формирование областей течения, описанных на стр. 124?

И шестое замечание.

В работе приведены результаты подробных исследований поведения таких параметров как: кинетическая энергия, энтропия, палинтрофия и др. Вместе с тем возникает вопрос о распределении и эволюции рейнольдсовых напряжений в слоях смешения термовязких жидкостей. Возможно, автору просто не хватило объема диссертации, чтобы изложить эту сторону исследований.

Переходя к заключительной части, отмечу, что нет сомнения в актуальности темы научных исследований, которая, прежде всего, с научной точки зрения заключается в рассмотрении турбулизации потоков в сдвиговых течениях в условиях заданного градиента температурного поля, в условиях зависимости свойств жидкости от температуры. Выполненная работа, она вполне заслуживает внимания с точки зрения методов расчета магистральных трубопроводов, маслопроводов в трансформаторах и для решения многих других задач, в том числе задач геофизики, прогнозирования процессов истечения магмы сквозь трещины земной коры. Научная новизна работы, она была достаточно подробно и в автореферате и еще более скрупулёзно рассмотрена в тексте

самой диссертации. Ну, а я со своей точки зрения, немного под своим углом зрения, хочу отметить следующие важные моменты, которые удалось обнаружить автору.

Во-первых, это обнаружение точки перегиба в профиле скорости течения термовязкой жидкости, доказательство её принципиального значения при формировании турбулентных течений. Эдуард Евгеньевич об этом уже говорил, начиная с теоремы Релея, здесь же получилось следующее. В то же время, как мы знаем в течении Пуазейля, которое мы исследуем, там нет точки перегиба, а здесь она появилась, и поэтому получается так, что с теоретической точки зрения, термовязкие жидкости, они оказались таким обобщающим объектом, где эти теоремы начинают работать все вместе.

Решена задача о длине установления ТВЖ. Такая начальная задача, она, тем не менее, так же достойна, чтобы расчетчики применяли вот эту формулу, которую Юрий Матвеевич установил. Еще отмечу модификацию численного метода КАБАРЕ в приложении к термовязким течениям. На основе численных исследований доказано, что в точке перегиба даже малые возмущения могут нарастать на некотором ограниченном интервале. В процессе эволюции двойного сдвигового слоя выделено семь вариантов течений, зависящих от числа Рейнольдса. И то, что при напорном течении термовязкой жидкости установлено существование двух принципиально отличающихся друг от друга режимов смешения.

Я в отзыве отметил уже теоретическую значимость, практическую значимость работы. Так или иначе, в своем выступлении я этих вопросов касался. Я это пропущу. А вот по поводу апробации результатов. Автор ответил на наше приглашение и приехал в Уфу и выступил в Институте механики имени Мавлютова Уфимского федерального исследовательского центра РАН. у и все остальные научные конференции, другие виды апробации, они приведены в автореферате. Публикаций вполне достаточный и очень достойный список. И перехожу к зачитыванию заключительной части.

Итак, диссертационная работа Куликова Юрия Матвеевича представляет собой весомый вклад в развитие гидродинамики. Она выполнена на высоком научном уровне, обладает внутренним единством и имеет важное научное и практическое значение. Работа соответствует паспорту специальности «Механика жидкости, газа и плазмы». Материалы диссертационной работы докладывались на международных и российских научных конференциях. А также научных семинарах. Основное содержание работы опубликовано в двадцати пяти работах, в том числе в девяти изданиях из перечня, рекомендованного ВАК Российской Федерации. Автореферат достаточно полно и правильно отражает содержание и суть полученных результатов диссертационной работы.

Результаты диссертации могут быть рекомендованы к использованию в научно-исследовательских, проектных и образовательных учреждениях, занимающихся исследованиями, связанными с вопросами термогидродинамики, моделирования турбулентных течений, механики многофазных сред. Эти результаты могут быть востребованы при создании объектов новых технологий и установок в энергетике, машиностроении, нефтяной промышленности. **Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным в п.9. Положения о порядке присуждения ученых степеней №842 от 24.09.2013 г., а её автор Куликов Юрий Матвеевич заслуживает присуждение ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «Механика жидкости, газа и плазмы».**

И в качестве заключительных слов своего выступления я хотел бы вернуться к началу своего выступления и сказать, что действительно работа очень достойная, и, с моей точки зрения, сделан значительный задел дальнейшей работы и завершения следующего <цикла> квалификационных работ Юрия Матвеевича. Я желаю ему дальнейших успехов и продолжения этой темы, связанной с изучением термовязких течений.

Спасибо за внимание.

Председатель

Спасибо, Саид Федорович, может быть, у кого-то есть вопросы к оппоненту.

Если вопросов нет, Юрий Матвеевич, вам слово для ответа на замечания прозвучавшие сейчас.

Куликов Ю.М.

В отзыве официального оппонента был высказан ряд замечаний. В частности, я просто их зачитаю в порядке их изложения.

Касательно выбора возмущений переменных в обобщении уравнения Орра-Зоммерфельда, схожее замечание было высказано и ведущей организацией. Ответ на него был дан ранее. Он связан со включением возмущений температуры в рассмотрение.

Также с отображением нейтральной кривой, соответствующей классическому

уравнению Орра-Зоммерфельда. ответ на это замечание также высказывался раньше. Я с ним согласен. Опять-таки факт существования малого параметра в знаменателе при исчезновении перепада температур, он привел к ошибочным выводам о том, что численные решения для профиля при малых альфа, то есть деление на ноль, оно может быть не корректным.

Третье замечание связано с опечаткой. Я с ним согласен. Надо только обратить внимание, что там специально описана структура алгоритма для двумерного течения с теплопроводностью. Добавление третьи компоненты скорости никаких принципиальных изменений для структуры численного метода не несет, однако, приведет к существенному увеличению объема изложения.

Четвертое замечание связано с существованием точки перегиба на кривой профиля скорости, с «которым автором связывается возникновение неустойчивости течения. Или все-таки можно говорить об особенностях его возникновения.»

Если быть до конца точным и следовать положениям, выносимым на защиту, то в них говорится о единстве безразмерной параметризации, в первом положении — формы профиля скорости и области устойчивости, равно как и в третьем положении говорится об окрестности точки перегиба без уточнения формы и размеров этой окрестности.

Прямых выводов о том, что появление точки перегиба приводит к потере устойчивости говорить нельзя. Так как существование точки перегиба является необходимым условием неустойчивости, а не достаточным. Условие Фьертофта, то есть вторая основная теорема в идеальной жидкости, также помочь не может, так как формулируется для монотонных профилей скорости. О свойствах течения Пуазейля здесь уже говорилось, поэтому для выявления более точной связи между точкой перегиба (критическим слоем) и развитием неустойчивости следовало бы в задаче об устойчивости воспользоваться энергетическим методом или рассмотреть завихренность в данной критической точке. Кроме того, полезно было бы рассмотреть пространственный инкремент неустойчивости в первой задаче главы пять, связанной с развитием гармонических возмущений в напорном течении термовязкой жидкости. Опять-таки в ответе на замечания я отталкиваюсь от изложения в диссертационном исследовании.

Пятое замечание связано с принципиальной значимостью точки перегиба для процессов перемешивания. Здесь нужно сказать, что данный факт является общим для всех сдвиговых течений, в частности, для течений идеальной жидкости, в которых может возникать неустойчивость Кельвина–Гельмгольца. Объяснение данному процессу и важности точки перегиба было дано в работе Бэтчелора в 1967 году. Он проследил динамику вихрей, используя их фундаментальное свойство. Каждая вихревая линия переносится вместе с жидкостью и вызывает вращательное движение с циркуляцией, равной интенсивности этой вихревой линии. Если мы будем рассматривать течение в терминах завихренности, то у нас будет существовать вихревой лист, тонкий вихревой слой, который под воздействием возмущений будет концентрироваться в определенных пространственных точках, в узлах, это приведет к возникновению уединенных вихрей и дальнейшему развитию неустойчивости Кельвина-Гельмгольца.

Последнее замечание связано с включением в рассмотрение тензора напряжений Рейнольдса. Мне кажется, что это очень полезное замечание. Оно связано с тем, что значительная часть исследований посвящена уравнению для турбулентной кинетической энергии, которое, на мой взгляд, оказалось не в достаточной мере плодотворным, потому что рассмотрение различных компонент этого уравнения, в частности диссипации или турбулентной адвекции, не всегда позволяет дать подробную интерпретацию, происходящим явлениям в силу отсутствия каких-либо источников или возможности сравнения с другими данными. На мой взгляд, действительно рассмотрение напряжений Рейнольдса оно могло оказаться более плодотворным. На этом все.

Председатель

Спасибо! На этом, в силу усталости всех членов, и, отсутствия дискуссии, на правах председательствующего я констатирую, что сегодняшнему диссертанту повезло. Во-первых, тут все сложилось прекрасно, начиная от глубокой физико-математической подготовки, полученной во время обучения в Физтехе, повезло с научным руководителем, сказать то, что не избитый предмет исследования — ничего не сказать. Все поняли, что термовязкая жидкость очень интересна, это просто начало тех исследований, которые никто не ожидал. В итоге, это все сложилось в купе, получены яркие оригинальные результаты, так что для меня вопрос поддерживать или поддерживать данную работу отсутствует. Тут все просто, я призываю <поддержать> всех членов совета, если у кого-то есть желание сказать пару-тройку слов, то я готов представить.

Медин С.А.

Можно сказать пару слов. Я тоже читал диссертацию, и тоже скажу, что она написана монографически. И молодым людям я бы рекомендовал бы читать этот конкретно текст, если они интересуются механикой сплошной среды. Это очень кратко. Это одна фраза.

Следующая фраза вот такая: смотрите, работа началась из физического предвидения авторов о том, что в течении термовязкой жидкости может образовываться точка перегиба. И с этого началась вся работа. Они поставили задачу, обнаружили точку перегиба и сделали второй очень важный шаг. Он почувствовали, что точка перегиба может явиться инициатором неустойчивости именно этого, конкретного термовязкого течения. И получили очевидную неустойчивость и турбулизацию, а дальше работа пошла совершенно естественным путем, потому что основная часть работы — четвертая и пятая главы, они посвящены неустойчивости определенного сорта течений, для этого нужно было сделать хороший код. Ну что, они сделали коды, здесь уже подробно рассказывалось, я не буду на этом останавливаться. В результате появились коды, которые могут считать жидкости, которые называются слабосжимаемыми, у которых задана зависимость между плотностью и давлением, а также могут считать жидкости теплопроводностные, и тогда появляется некий набор кодов, которые можно сегодня применять к решению научных и технических задач. И обычно, когда набор задач не подкрепляется другими экспериментами в других работах, обычно пишут, что результаты, полученные в этой работе, позволяют сформулировать экспериментальные направления, ну например, если говорить о точке перегиба, то конечно экспериментальная демонстрация точки перегиба, она была бы, конечно, совершенно превосходной. По этому упрек, что здесь нет сравнения с экспериментом, — действительно нет сравнения с экспериментом, потому, что таких экспериментов никто не ставил, и они, вероятно, еще впереди. Если коротко, то я должен присоединиться к мнению оппонента, который только что выступил, очень четко и ясно, и согласиться с тем, что работу нужно поддерживать и голосовать положительно.

Председатель

Спасибо, Станислав Александрович!

Ну что, приступаем к выборам счетной комиссии, у нас стандартный вариант, чтобы сэкономить нам время — Зайченко Виктор Михайлович, Попель Олег Сергеевич <председатель счетной комиссии>, Чиннов Валерий Федорович.

Кто за этот состав? — Единогласно.

Попель О.С.

Товарищи, все готово, давайте!

Алексей Юрьевич, можно доложить?

Результаты голосования за — 17, против — 0, недействительных — 0. Все единогласно.

Кто за то, чтобы утвердить протокол? — 17

Кто против? — Нет.

Итак, все за — единогласно.

Давайте я воспользуюсь возможностью, и предоставим слово соискателю.

Куликов Ю.М.

В первую очередь хотел бы поблагодарить Диссертационный совет Института высоких температур, который принял диссертацию к защите, постоянно помогал советами, как по содержательной части, так и подготовке документации. Кроме того, хотел бы поблагодарить своего научного руководителя, Сона Эдуарда Евгеньевича за постановку интересной задачи, глубокое предвидение интересных результатов, а также за удачный выбор численного метода КАБАРЕ, с которым было очень интересно работать, и постоянную помощь и поддержку в решении различных вопросов. Хотелось бы также поблагодарить своих коллег, которые стали читателями многих глав этой диссертационной работы, всячески помогали. А также поблагодарить Леонида Михайловича Василяка и его коллег, за помощь при подготовке выступления, кроме того, хотелось бы поблагодарить Гаджиева Махача Хайрудиновича и Тюфтяева Александра Семеновича, которые являются моими непосредственными руководителями и помогали мне в организационных вопросах. Кроме того, нас связывает не только термовязкая жидкость, но и исследования в области плазмотроностроения. Большое спасибо!

Председатель

Нам предстоит принять еще проект заключения Диссертационного совета. У кого есть какие-либо вопросы, замечания, пожелания?

(Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения
Кто за этот вариант проекта? — 17
Кто против? — Нет.
Кто воздержался? — нет.
Принято единогласно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.110.03, СОЗДАННОГО НА
БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
НАУКИ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 15.05.2019 протокол № 9

О присуждении Куликову Юрию Матвеевичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Устойчивость и турбулентность течений термовязкой жидкости» в виде рукописи по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы, принята к защите 04.03.2019 г., протокол № 4, диссертационным советом Д 002.110.03 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, г. Москва, 125412, <https://jiht.ru>, +7 (495) 485-8345), утвержденным Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 11.04.2012 г. № 105/нк.

Соискатель Куликов Юрий Матвеевич, 1990 года рождения, в 2013 году окончил Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет).

В 2017 году окончил очную аспирантуру Московского физико-технического института (национального исследовательского университета).

Диссертация выполнена на кафедре физической механики Физтех-школы аэрокосмических технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Работает научным сотрудником Лаборатории № 18 – Плазменных технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор, академик Российской академии наук Сон Эдуард Евгеньевич, заведующий кафедрой физической механики Физтех-школы аэрокосмических технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор, Головизнин Василий Михайлович, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», профессор кафедры вычислительных методов Факультета вычислительной математики и кибернетики, заведующий лабораторией индустриальной математики;

доктор физико-математических наук, профессор, Урманчеев Саид Федорович, Институт механики имени Р.Р. Мавлютова – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, главный научный

сотрудник лаборатории «Механика многофазных систем» дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (г. Санкт-Петербург) в своем положительном заключении, составленном заведующим кафедрой «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен» СПбПУ, доктором физико-математических наук, профессором Смирновым Евгением Михайловичем и доцентом кафедры «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен» СПбПУ, кандидатом физико-математических наук Смирновским Александром Андреевичем (утвержденном проректором по научной работе, членом-корреспондентом РАН Сергеевым В.В.), указала на актуальность темы диссертации, связанную с необходимостью развития фундаментальных представлений о различных режимах движения термовязкой жидкости и множеством практических приложений (продукты переработки нефти, растворы полимеров, расплавы горных пород). Ведущей организацией отмечена значимость результатов работы:

1. Сформулировано дифференциальное уравнение типа уравнения Орра-Зоммерфельда; определены значения критического числа Рейнольдса потери устойчивости при изменении в широких пределах относительного перепада температур на противоположных стенках канала.
2. Осуществлена адаптация современной, обладающей многими достоинствами численной схемы КАБАРЕ к рассматриваемому классу течений, разработан и верифицирован собственный программный код для расчёта ламинарных, переходных и турбулентных режимов течения термовязкой жидкости.
3. Выполнен большой объем численных экспериментов, в целом направленных на идентификацию и количественную оценку двумерных и трехмерных нелинейных процессов, определяющих интенсивность перемешивания в течениях термовязкой жидкости.
4. Автором накоплен большой опыт проведения ресурсоемких численных экспериментов по оценке ключевых характеристик турбулентности в течениях термовязкой жидкости, который будет, несомненно, полезен для постановки последующих исследований в этой области.

Соискатель имеет 9 статей в реферируемых журналах из списка ВАК, 16 тезисов в сборниках трудов конференций.

Основные работы:

1. Kulikov Y.M., Son E.E. Fluid flow with abrupt viscosity-temperature dependence // High Temperature. – 2014. – Vol. 52, no 5. – P. 723–729.
2. Kulikov Y.M., Son E.E. The CABARET method for a weakly compressible fluid flows in one- and two-dimensional implementations // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 774, no 1. – P. 012094.
3. Куликов Ю.М., Сон Э.Е. Об устойчивости течения термовязкой жидкости в канале // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – Т. 24, № 6. – С. 909–928.
4. Kulikov Y.M., Son E.E. Stability of thermoviscous fluid flow under high temperature gradients // High Temperature. – 2017. – Vol. 55, no 1. – P. 131–138.
5. Kulikov Y.M., Son E.E. CABARET scheme implementation for free shear layer modeling // Computer Research and Modeling. – 2017. – Vol. 9, no 6. – P. 881–903.
6. Kulikov Y.M., Son E.E. Kelvin–Helmholz instability in thermoviscous free shear flow // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 946. – P.012075.
7. Kulikov Y.M., Son E.E. Taylor–Green vortex simulation using CABARET scheme in a weakly compressible formulation // The European Physical Journal E. – 2018. – Vol. 41, no 3.
8. Kulikov Y.M., Son E.E. On the Construction of Turbulent Transfer Spectral Models Using 3D Numerical Simulation of Taylor–Green Vortex Decay // High Temperature. – 2018. – Vol. 56, no 6. – P. 921–926.

9. Куликов Ю.М., Сон Э.Е. Режимы течения термовязкой жидкости в плоском неизотермическом слое // Теплофизика и аэромеханика. – 2018. – Т. 25, № 6. – С. 877–897.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (д. ф.-м.н., профессор кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества физического факультета МГУ Знаменская Ирина Александровна) — отзыв положительный, с замечаниями:

1. «На стр. 9 автореферата: «Уравнения Навье-Стокса для стационарного течения несжимаемой жидкости сводятся к параболизированному уравнению». По-видимому, имеется в виду — к параболическому уравнению.»

2. «На стр. 11 автореферата: «Сформулированы периодические граничные условия, сохраняющие перепад давления в расчётной области в направлении периодичности» следует ли это понимать как граничные условия для инвариантов, обеспечивающие перепад давления?»

3. «Из автореферата можно понять, что результаты исследования не сравнивались с экспериментальными данными, желательно было бы сравнить.»

2. ФГУП ЦНИИмаш (д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Шманенков Валерий Николаевич) — отзыв положительный, без замечаний;

3. ФГУП ГНЦ «Центр Келдыша» (д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник отделения твердотопливных ракетных двигателей) — отзыв положительный, с замечаниями:

«В качестве замечания надо отметить, что для некоторых термовязких жидкостей характерна немонотонная зависимость коэффициента вязкости от температуры, однако этот случай, судя по автореферату, в диссертации не рассматривался.»

4. МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ) (д.ф.-м.н., заведующий кафедрой «Теплофизика» Чирков Алексей Юрьевич) — отзыв положительный, с замечаниями:

«желательно было более подробно, чем это сделано на стр. 11, описать систему уравнений, решаемых численно по схеме Кабаре, включая подход к описанию турбулентности, а также уделить немного больше внимания механизму численной диссипации в схеме Кабаре применительно к условиям решаемых задач.»

5. ООО «ТЕСИС» (к.ф.-м.н., технический директор Аксенов Андрей Александрович) — отзыв положительный, с замечаниями:

«автор не привел сравнения расчетов с экспериментальными данными и/или данными других авторов, хотя практически все расчеты выполнены с исследованием сходимости по расчетной сетке. Также необходимо было бы привести обычные тесты расчетной схемы на наличие свойства монотонности и транспортности, как выполнено во многих работах Леонардо или Гартена (одномерное движение с постоянной скорости уступа, полусинуса, полусферы и так далее).»

6. Института теплофизики СО РАН (к.ф.-м.н., с.н.с. Мулляджанов Рустам Илхамович) — отзыв положительный, с замечаниями:

1. «Кажется странным, что зависимость ошибки численного решения уравнения Орра-Зоммерфельда при увеличении числа полиномов Чебышева монотонно растет при $N > 70$ (Рис. 2а). В автореферате это приводится без соответствующих пояснений.»

2. «На Рис. 2б показаны кривые нейтральной устойчивости для различных значений параметра α в плоскости $k-Re$. Логично было бы привести сравнение, начиная с малых α , со случаем классического плоского течения Пуазейля.»

3. «В последние двадцать лет существенно развита немодальная теория устойчивости, которая, в частности, дает объяснение почему ламинарно-турбулентный переход происходит раньше в плоском канале, чем предсказывает уравнение Орра-Зоммерфельда и анализ наиболее неустойчивой моды, а также ламинарно-турбулентный переход в круглой трубе. Этот вопрос в автореферате не отражен.»

4. «Является ли развитие численных методов предметом для отдельной содержательной главы (глава 4), по которой должны быть сделаны выводы о физике рассматриваемых процессов? Кажется, что уместнее было бы включить это описание в первую главу, где описаны методы и подходы.»

5. «В главе 5 нет пояснения, что такое Z-t диаграммы.»

7. Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (д.ф.-м.н, профессор, заведующий Лабораторией морских течений, Жмур Владимир Владимирович) — отзыв положительный, без замечаний.

8. ИПМ им. М.В. Келдыша (д.ф.-м.н., главный научный сотрудник ФИЦ ИПМ им. М.В. Келдыша, Змитренко Николай Васильевич) — отзыв положительный, без замечаний.

9. КНИТУ–КАИ (д.ф.-м.н., главный научный сотрудник НИЛ №16, профессор кафедры теплотехники и энергетического машиностроения Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ, Тукмаков Алексей Львович) — отзыв положительный, без замечаний.

10. ИПХФ РАН (д.ф.-м.н., заведующий лабораторией «Вычислительной гидродинамики» ФГБУН ИПХФ РАН, Султанов Валерий Гулямович) — отзыв положительный, без замечаний.

11. Казанский федеральный университет (д.т.н., профессор, член-корреспондент АН Республики Татарстан, Проректор по инженерной деятельности КФУ, директор Инженерного института КФУ, заведующий кафедрой технической физики и энергетики КФУ, Кашапов Наиль Фаикович) — отзыв положительный, с замечаниями:

«При учете зависимости вязкости от температуры недостаточное внимание уделено пристеночным областям, так, например, в объемах жидкости, имеющих относительно протяженную свободную поверхность и малый вертикальный размер – таких, как тонкие горизонтальные слои и пленки жидкости, объемные силы оказываются малы по сравнению с поверхностными. В этих случаях конвективное течение Марангони, возникающее в жидких средах вблизи поверхности раздела фаз, может быть обусловлено наличием вдоль поверхности градиента температуры и способно вносить существенный вклад в процессы тепло/массообмена, а также влиять на форму свободной поверхности, вызывая поверхностные деформации и даже перемещения всего объема жидкости в целом. Межфазная конвекция существенно влияет на интенсивность многих технологических процессов в пищевой, химической, нефтяной, металлургической и других отраслях промышленности.»

12. АО ГРЦ им. академика В.П. Макеева (д.ф.-м.н., доцент, главный научный сотрудник АО ГРЦ им. ак. В.П. Макеева Мокин Юрий Александрович) — отзыв положительный, с замечаниями:

В материалах автореферата указано, что при моделировании течения ТВЖ, в различных разделах работы использованы две модели возмущений: детерминированные слабые гармонические возмущения или случайные (хаотические), характеризуемыми «длиной корреляции». Поскольку не указан второй объект корреляционной связи, по-видимому, речь идет об автокорреляции. В материалах автореферата слабо отражены физические условия, факторы и предпосылки реализации того или иного вида возмущений. Кроме того, по нашему мнению, было бы интересно рассмотреть вопрос о характере влияния суперпозиции гармонических и хаотических возмущений. В частности – имеет ли место при этом, в каком-либо смысле, свойство линейности?

13. ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева (к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ПАО РКК «Энергия» Журин Сергей Викторович) — отзыв положительный, с замечаниями:

1. В автореферате явно не отражено сопоставление результатов численных расчетов с экспериментальными данными.

2. Каким образом полученные результаты могут использоваться в практических задачах?

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что:

- д.ф.-м.н., профессор Головизнин В.М. является ведущим ученым в области численных методов, крупным специалистом в области вычислительной гидродинамики, создателем численного метода КАБАРЕ:

1. Goloviznin V.M., Solovjov A.V., Zalesny V.B. A new algorithm for solving the shallow water equations on the sphere based on the CABARET scheme // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2018. — P. 6-12;

2. Глотов В.Ю., Головизнин В.М., Сергеев К.М. LES-моделирование турбулентного теплообмена при течении свинцового теплоносителя в круглой трубе при различных числах Рейнольдса // *Математическое моделирование*. — 2018. — Т. 30, № 7. — С. 46-53;

3. Goloviznin V.M., Chetverushkin B.N. New Generation Algorithms for Computational Fluid Dynamics // *Computations Mathematics and Mathematical Physics*. — 2018. — Т. 58, № 8. — P. 1217-1225;

- д.ф.-м.н., профессор Урманчеев С.Ф. является крупным специалистом в области исследования течений со сложными реологическими свойствами, многофазных сред, ведущим ученым в области изучения термовязких и аномально термовязких жидкостей:

1. Сапсай А.Н., Шарафутдинов З.З., Урманчеев С.Ф. Определение оптимального радиуса кривизны скважины для сооружения подводного перехода // *Нефтяное хозяйство*. — 2019. — № 2. — С. 90-93;

2. Низамова А.Д., Киреев В.Н., Урманчеев С.Ф. Определение критического числа Рейнольдса в задаче об устойчивости течения термовязкой жидкости // *Вестник Башкирского университета*. — 2018. — Т. 23, № 3. — С. 627-634;

3. Кулешов В.С., Моисеев К.В., Хизбуллина С.Ф., Михайленко К.И., Урманчеев С.Ф. Особенности конвективных течений аномально термовязкой жидкости // *Математическое моделирование*. — 2017. — Т. 29, № 5. — С. 16-26;

Выбор федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» в качестве ведущей организации обусловлен тем, что «СПбПУ» является многопрофильным учреждением, в состав которого в качестве структурного подразделения входит Институт прикладной математики и механики. В институте на кафедре «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен» активно ведутся исследования в области моделирования турбулентных течений жидкости и газа, что близко к тематике диссертационного исследования соискателя.

1. Smirnov E.M., Smirnovsky A.A., Schur N.A., Zaitsev D.K., Smimov P.E. Comparison of RANS and IDDES solutions for turbulent flow and heat transfer past a backward-facing step // *Heat and Mass Transfer*. — 2018. — Vol. 54, Issue 8. — P. 2231-2241.

2. Shur M., Strelets M., Travin A., Spalart P., Suzuki T. Unsteady simulations of a fan/outletguide-vane system: aerodynamics and turbulence // *AIAA Journal*. — 2018. — Vol. 56, № 6. — P. 2283-2297;

3. Zasimova M.A., Ivanov N.G. Numerical Simulation of Air Distribution in a Room with a Sidewall Jet under Benchmark Test Conditions // *AIP Conference Proceedings*. — 2018. — Vol. 1959, № 050033. — P. 1-6.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

— установлено, что форма профиля скорости термовязкой жидкости с экспоненциальной температурной зависимостью динамической вязкости в установившемся течении в канале, стенки которого имеют различную температуру, является функцией безразмерного параметра α . Значения последнего для некоторой термовязкой жидкости определяются только перепадом температур. Вариация α в диапазоне $\alpha < -1.5936 < \alpha > 1.5936$ приводит к изменению выпуклости формы профиля скорости (появлению точки перегиба);

— получено обобщение уравнения Орра–Зоммерфельда на класс термовязких жидкостей с экспоненциальной зависимостью вязкости от температуры, обладающее рядом

дополнительных членов, отражающих вклад резкой температурной зависимости вязкости жидкости в характеристики устойчивости течения.

— показано, что кривая нейтральной устойчивости смещается в область малых чисел Рейнольдса и длинноволновых возмущений при больших значениях $|\alpha|$ в диапазоне существования точки перегиба в основном профиле скорости.

— выполнена программная реализация численного метода КАБАРЕ на основе приближения слабой сжимаемости для расчёта течений в двумерной и трёхмерной постановках;

— предложено дополнительное ветвление алгоритма численного метода КАБАРЕ на этапе расчета третьего и последующих инвариантов Римана;

— показано, что процесс развития неустойчивости в канале, связанный с эволюцией гармонических возмущений в плоском течении, происходит наиболее интенсивно в окрестности точки перегиба;

— на основе метода Окубо–Вейса установлено существование четырёх областей течения, в которых возможна активная филаментация турбулентной пелены или длительное существование вихревых структур.

— показано, что длина установления профиля ТВЖ x есть резкая функция параметра α — $x = A(\alpha) \left[\left(\left[\text{Re} \right]^{*} \right)^{-\alpha} \right]$.

— установлено существование сильной турбулентности в верхней половине течения в канале с интенсивностью в диапазоне $\langle I \rangle \sim 0.184 - 0.236$ практически до конца расчёта.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

— изучены характеристики устойчивости сдвиговых течений термовязкой жидкости как с непрерывным, так и разрывным распределением вязкости в сдвиговом слое;

— получены характеристики крупномасштабного смешения жидкости в термовязкой жидкости;

— расширены представления об очаговой турбулентности, возникающей в течениях со стратификацией материальных параметров, в частности, с вязкой стратификацией в неоднородном температурном поле.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

— выявлено решающее влияние температурной зависимости вязкости жидкости не только на распределение скорости в некотором установившемся течении, но также и на его устойчивость, приводящее к смене режима течения и изменению характера теплообмена.

— результаты указывают на необходимость обязательного учёта температурной зависимости вязкости при проведении моделирования течений жидкости и газа;

— разработан и верифицирован собственный программный код для расчета ламинарных, турбулентных и переходных режимов течений термовязкой жидкости;

— расширен опыт применения схемы КАБАРЕ, реализованной в приближении слабой сжимаемости, в двумерной и трёхмерной постановках, что позволяет судить о результативности данного метода для расчёта сдвиговых неустойчивостей, вихревых течений, турбулентности и связанных с ними процессов теплообмена.

Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы для использования в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Институте проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, РФЯЦ – Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики, Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Институте автоматизации проектирования РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Центральном аэрогидродинамическом институте им. проф. Н.Е. Жуковского, ОАО «Холдинговая компания «ЭЛЕКТРОЗАВОД», АО «НТЦ ФСК ЕЭС», ПАО «НК «Роснефть»

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

— результаты получены методами вычислительной гидродинамики; перед непосредственным решением задач диссертации осуществлялось проведение тестов на

сходимость решения по расчетной сетке, а также определение оптимальных начальных данных;

— установлено качественное и количественное согласие авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике;

— основные результаты были представлены на 16 международных и всероссийских конференциях.

Личный вклад соискателя является основным и состоит в разработке программного кода, его верификация и валидации. Постановка задач, а также анализ результатов, представленных в диссертационном исследовании, проведены коллективом соавторов при определяющем участии автора. Апробация результатов исследования проводилась на 16 российских и международных конференциях, в которых соискатель принимал личное участие. Основные публикации по выполненной работе также подготовлены лично автором.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, соответствует критериям пункта 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

На заседании от 15.05.2019 г. диссертационный совет принял решение присудить Куликову Ю.М. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 12 докторов наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы, и 5 докторов наук по специальности 05.14.01 – энергетические системы и комплексы, участвовавших в заседании, из 25 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 17, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель диссертационного совета Д 002.110.03
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор

Вараксин А.Ю.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.03
д.т.н.

М.П.



Директор Л.Б.

15.05.2019 г.