

## ОТЗЫВ

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

### *Вводная часть*

Теория турбулентности вместе с теорией гидродинамической устойчивости представляют собой обширную область механики жидкости и газа, тесно связанную с различными разделами физики и математики. Их значение обусловлено, прежде всего, широким применением в технике и технологиях. Задачи, которые ставились перед развивающимися отраслями промышленности, определили и направление развития этих теорий. Наиболее важным фактором при этом были и остаются модельные представления о свойствах жидкостей и газов. До последнего времени пристальное внимание, в основном, уделялось движению сред с неизменными физическими параметрами. Новые технологии привели и к постановке новых задач, в частности, возникла необходимость в изучении движения жидкостей с переменными свойствами. Определяющим физическим параметром при течении жидкостей является вязкость. Разумеется, зависимость вязкости от температуры у большинства жидкостей можно описать соотношениями аррениусовского типа. Однако в исследованиях по гидродинамике этим обстоятельством было принято пренебрегать. Лишь на рубеже веков проблема учёта зависимости вязкости от температуры стала привлекать внимание исследователей в связи с решением практических задач по течению жидкостей при значительных температурных градиентах, когда фактор изменения вязкости становится существенным. В представленной работе были начаты систематические исследования по созданию теории устойчивости и турбулентных течений жидкостей с учётом зависимости вязкости от температуры – термовязких жидкостей.

### *Разбор диссертации:*

Диссертация состоит из введения, списка сокращений и условных обозначений, пяти глав, заключения, списка литературы, списка рисунков и списка таблиц. Общий объем диссертационной работы составляет 227 страниц. Работа содержит 117 рисунков и 19 таблиц. Список литературы содержит 245 наименований.

Во введении охарактеризовано значение исследований в области гидродинамической устойчивости и теории турбулентности, рассмотрены основные подходы к описанию явления турбулентности. Учитывая зависимости материальных коэффициентов от температуры, представлена связь с проблемами



тепловой конвекции, после чего автор переходит к рассмотрению жидкостей с вязкостью, зависящей от температуры – так называемым термовязким жидкостям. На примерах показаны степень распространённости и значение этих жидкостей в технических приложениях и природных процессах.

Диссертантом представлены объект исследования, цель работы, научная новизна, основные положения, выносимые на защиту и другие формальные характеристики выполненной работы.

*В первой главе* дан обзор работ об общих свойствах турбулентных течений и проблемах, связанных с их моделированием. Анализ литературы по турбулентности приведён в контексте развития основных идей, лежащих в основе модельных представлений о характере и определяющих параметрах турбулентных течений. Отдельно описана теория однородной изотропной турбулентности А.Н. Колмогорова и её основные результаты. Изложены также популярная среди инженеров-расчётчиков  $k-\epsilon$  модель турбулентности и численные модели, основанные на подходах RANS, LES, DNS. Особое внимание уделено численному моделированию неустойчивостей в сдвиговых течениях с акцентом на работах Бэтчелора и Крейчнана. Рассмотрена задача о распаде вихря Тейлора-Грина, которая в дальнейшем служила в качестве теста для численного алгоритма автора диссертации. Представлена классификация термовязких жидкостей (ТВЖ), их физические свойства и особенности течения в неоднородном температурном поле. В заключительной части первой главы описаны проблемы процессов смешения, устойчивости течения и турбулентности в ТВЖ.

*Во второй главе* исследуются напорные течения и вопросы гидродинамической устойчивости термовязких жидкостей. Уравнения Навье-Стокса для течения жидкости с переменной вязкостью в случае стационарного течения сведены к одному уравнению второго порядка. Это дало возможность построить безразмерные профили скоростей потока по сечению плоского канала в зависимости от введённого параметра  $\alpha$ , характеризующего показатель экспоненциальной зависимости вязкости от температуры. Автором было обращено внимание на возникновение точки перегиба на профилях скоростей при определённых значениях параметра. Далее была решена задача о длине установления течения ТВЖ в плоском канале. Аналитически длина установления была представлена в виде двухпараметрической зависимости от приведённого числа Рейнольдса и параметра  $\alpha$ .

Основное внимание во второй главе уделено исследованию устойчивости ТВЖ в плоском канале. В линейном приближении было получено обобщённое уравнение Орра-Зоммерфельда с учётом зависимости вязкости от температуры. При этом получено неожиданное следствие о невозможности сведения соответствующего уравнения для поперечной компоненты возмущения скорости, записанного относительно функции тока к своему аналогу – уравнению для исследования гидродинамической устойчивости ТВЖ через функцию тока для возмущения. Исследование обобщённого уравнения Орра-Зоммерфельда было



выполнено численно с использованием многочленов Чебышева. Основные результаты численного исследования представлены в виде кривых нейтральной устойчивости, построенных в зависимости от параметра  $\alpha$  и спектров собственных значений для плоского течения Пуазейля.

В третьей главе построен алгоритм для численного исследования вязкой слабосжимаемой теплопроводной жидкости, основанный на схеме КАБАРЕ. В качестве тестов были решены задачи о распространении возмущений в модели слабосжимаемой жидкости и установления плоского течения Пуазейля.

В четвёртой главе изучены процессы смешения в изотермических сдвиговых течениях. Основной теоретической посылкой в этой главе стало вполне обоснованное предложение автора рассматривать эволюцию течения с помощью функции завихренности и построенной на её основе энстрофии. При решении задачи об эволюции двойного вихревого слоя были построены зависимости кинетической энергии и энстрофии от времени. Отмечается, что скорость диссипации энергии является быстро осциллирующей функцией времени, но при помощи приёма, использованного автором с помощью масштабирования, этих осцилляций удалось избежать. В итоге была показана эффективность применения схемы КАБАРЕ в задаче о диффузии вихря. Анализ кривых палинстрофии позволил сделать вывод о том, что двумерная турбулентность подчиняется общим закономерностям, несмотря на имеющиеся отличия в характере развития неустойчивой моды. Большой материал для размышлений дают поля завихренности, построенные для различных расчётных сеток и в зависимости от времени. Эти результаты весьма наглядны и дают чёткое представление о рассматриваемых процессах. Тщательность исследований автора диссертации подтверждается и расчётами, связанными с построением инкремента неустойчивости для одномодовых возмущений, которые дают основание для доверия к полученным в дальнейшем научным результатам.

Ещё одна тестовая задача – эволюция вихря Тейлора-Грина выделена в самостоятельный раздел четвёртой главы. При его описании построены интегральные кривые кинетической энергии и энстрофии. На основе полученных результатов, с учётом сравнения с другими подходами при моделировании турбулентных течений сделаны выводы о некоторых ограничениях при использовании метода КАБАРЕ. Однако подчёркивается его универсальность и способность воспроизводить все основные характеристики и интегральные параметры вихревых структур как при ламинарном, так и при турбулентном распаде.

В пятой главе речь идёт о результатах моделирования сдвиговых течений термовязких жидкостей и процессов перемешивания в них. Во-первых, автором диссертации была подробно описана постановка задачи и проведено исследование сеточной сходимости, что позволило установить необходимое число ячеек для адекватного воспроизводства результатов исследования. Затем проведено исследование развития возмущений для различных амплитуд в зависимости от



удаления от точки перегиба. Показано, что в точке перегиба даже малые возмущения могут на определённой дистанции нарастать. Построены кривые для толщины слоя вовлечения для различных изолиний температуры, причём в зоне высоковязких слоёв происходит быстрое затухание возмущений, несмотря на резкий их первоначальный всплеск. Проведены расчёты изменения толщины слоя вовлечения для различных амплитуд возмущений по длине канала. Подробно изучена зависимость толщины слоя смещения от числа Прандтля. Для больших значений числа Прандтля вначале происходит резкое вовлечение горячего гребня в холодный поток, а затем, ближе к середине канала, сворачивание его в «клубок». Далее описаны интересные особенности процесса смещения для меньших значений числа Прандтля когда высота гребня возрастает, происходит и более раннее сворачивание в «клубок». Показано, что практически все изолинии температуры отклоняются в область холодной стенки, а при наименьших рассмотренных значениях числа Прандтля высокая теплопроводность приводит к уменьшению слоя вовлечения.

Следующий раздел пятой главы посвящён выделению характерных зон в течении в зависимости от преобладания одного из тензоров, характеризующих поток, завихренности или деформации. В этом случае был использован критерий Окубо-Вейса, отвечающий за существование вихрей и позволяющий определять структуру течения. Таким образом было установлено, что наличие перегиба в профиле скоростей имеет решающее значение при формировании крупномасштабного смещения: этот процесс будет усиливаться с развитием течения в пространстве и непосредственно не связан с генерацией возмущений и завихренности в пристеночном слое течения.

Далее представлены результаты моделирования крупномасштабного смещения в двойном сдвиговом слое. При постановке задачи определена аналитическая формула для сглаживания разрыва продольной скорости, в которой присутствует параметр, управляющий толщиной начального слоя смещения. Произведены расчёты инкремента неустойчивости, оценка сеточной сходимости и точности значений инкремента неустойчивости. Аналогичные оценки выполнены и при расчёте толщины потери импульса. При описании процесса смещения выделено 7 вариантов эволюции сдвигового течения, которые сменяют друг друга при различных числах  $R_v$  и  $Re$ , а их подробные характеристики приведены в тексте диссертации. В итоге сделан важный вывод об эволюции затопленной горячей струи, проникающей в холодную жидкость: происходит «превращение» струи в пограничный слой, в котором и происходит перемешивание.

Заключительный и самый большой раздел пятой главы посвящён турбулентному смещению при напорном течении термовязкой жидкости в трёхмерной области. При постановке задачи и её численной реализации был учтён опыт предыдущих глав. Особенности заключаются в использовании периодических граничных условий и построении алгоритма решения задачи, также основанного на методе КАБАРЕ, с применением гибридного распараллеливания на



основе технологий OpenMP и MPI. С учётом особенностей проведения расчётов в трёхмерной области был построен фильтр соленоидального поля для минимизации начальной недивергентности поля скорости. Большой интерес вызывают графические изображения структуры вихревого поля, распределения энтропии и выводы о влиянии трёхмерной структуры потока на турбулизацию течения, а его сжимаемости – на параметры турбулентности. В итоге установлено существование двух принципиально отличающихся друг от друга режимов течения. Один из них реализуется при умеренных среднемассовых числах Рейнольдса и связан с перестройкой неустойчивого ламинарного профиля при воздействии трёхмерных возмущений. Во втором реализуется режим турбулентности с ускоренной диссипацией, приводящей к значительному уменьшению кинетической энергии и активному возбуждению завихренности.

*Выводы.* В Заключение диссертации представлены выводы, состоящие из восемнадцати пунктов, в которых последовательно отображены результаты исследований.

### *Замечания*

1. В работе при выводе обобщённого уравнения Орра-Зоммерфельда возмущения прикладывались лишь к некоторым гидродинамическим параметрам: компонентам вектора скорости и давлению. Каким образом изменятся результаты исследования устойчивости течения ТВЖ при возмущении всех переменных параметров задачи? Какого критерия отбора возмущаемых параметров придерживался автор?
2. На рисунке 2.3б не указана нейтральная кривая, соответствующая классическому уравнению Орра-Зоммерфельда. Её изображение могло бы послужить основанием для дополнительных выводов.
3. В третьей главе в п. 3.3 фактически подробно описан алгоритм расчёта течения вязкой слабосжимаемой теплопроводной жидкости в прямоугольной области с использованием схемы КАБАРЕ. Возникает вопрос, почему в названии отмечено «слабосжимаемой нетеплопроводной жидкости»? Это опечатка?
4. В работе установлен важный факт наличия точки перегиба на кривой профиля скорости для термовязких жидкостей, который автором связывается с возникновением неустойчивости течения. Или речь идёт об особенностях её возникновения?
5. В чём 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?
6. 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 смещения термовязких жидкостей. Возможно автору



просто не хватило объёма диссертации, чтобы изложить эту сторону исследований.

### *Актуальность работы*

Несмотря на обширную научную литературу по гидродинамической устойчивости и турбулентным течениям множество вопросов до последнего времени оставались за пределами внимания исследователей. К ним относятся, прежде всего, турбулизация потоков в сдвиговых течениях в условиях заданного градиента температурного поля с учётом зависимости свойств жидкости от температуры. Помимо теоретического интереса к указанной проблеме её содержание неразрывно связано с многочисленными приложениями. Фактически большинство промышленных трубопроводных систем функционирует в условиях наличия перепадов температур и довольно значительных как по сечению трубы, так и по её длине. При этом решающее значение для проектных организаций и специалистов по эксплуатации имеет возможность предсказания режимов потока, которые определяют расходные характеристики трубопровода и энергозатраты на транспортировку рабочих жидкостей. Эта проблема имеет первостепенное значение для магистральных трубопроводов, связанных с транспортировкой высоковязкой аномальной нефти в так называемых «горячих» трубопроводах, для теплообменников – конденсаторов серы и других веществ со сложными реологическими характеристиками, а также для расчёта режимов жидкометаллических теплоносителей при эксплуатации судовых ядерных силовых установок. Интересные приложения возникают и в задачах исследования природных процессов, таких как движение магмы в трещинах земной коры, растекание лавы или решение задачи идентификации астрономических наблюдений вулканической активности на других планетах. Таким образом **актуальность** темы исследований не вызывает сомнений.

### *Научная новизна*

Прежде всего, следует отметить тот факт, что в представленной работе впервые поставлена задача о гидродинамической устойчивости и турбулентных течениях термовязких жидкостей. Научная новизна полученных результатов достаточно полно и чётко выделена как в тексте самой диссертации, так и в автореферате. Можно, в частности, выделить следующие новые результаты:

обнаружение точки перегиба в кривой профиля скорости при течении термовязкой жидкости и доказательство её принципиального значения при формировании режимов турбулентных течений;

решена задача о длине установления течения ТВЖ в плоском канале;

модификация алгоритма численного метода КАБАРЕ в приложении к расчётам термовязких течений;

на основе численных исследований доказано, что в точке перегиба даже малые возмущения могут нарастать на некотором ограниченном интервале;

при описании процесса смешения в двойном сдвиговом слое выделено 7 вариантов эволюции сдвигового течения, зависящих от чисел Рейнольдса;

при напорном течении термовязкой жидкости в трёхмерной области установлено существование двух принципиально отличающихся друг от друга режимов смешения.

### *Теоретическая значимость работы*

Теоретическая значимость работы определяется значительным числом установленных новых научных фактов, которые отвечают на целый ряд вопросов, уже возникших в исследованиях по термогидродинамике. Важную роль играет и методическая сторона представленной диссертации, в которой последовательно продемонстрированы многие тонкости при достижении тех или иных результатов. Безусловно, работа позволяет значительно расширить теоретические представления о характере турбулентности в сдвиговых термовязких течениях, о слоях вовлечения и крупномасштабном перемешивании.

### *Практическая значимость работы*

Значимость работы с практической точки зрения также связана с теми новыми результатами, которые были получены автором. По этим результатам, в частности, можно судить об особенностях тепло- и массообменных процессов в термовязких средах, об условиях смены режимов течения. Фактически на многочисленных примерах доказана необходимость учёта зависимости вязкости жидкости от температуры не только в ламинарных, но и в турбулентных течениях.

Следует отметить также создание целого пакета прикладных программ для расчёта турбулентных течений в двумерных и трёхмерных областях с учётом температурной зависимости вязкости рабочей жидкости.

Результаты работы обладают большим потенциалом применения в расчётной практике отраслевых проектных и исследовательских учреждений.

### *Апробация работы*

Результаты исследований автора диссертации были доложены на 17 российских и международных научных конференциях. Кроме того, автор представил материалы диссертации на нескольких научных семинарах, в частности, в ИМех УФИЦ РАН.

### *Публикации*

Список публикаций насчитывает 25 наименований в печатных изданиях, 9 из них опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и индексируемых в WoS и SCOPUS, остальные 16 – тезисы докладов.

### *Личный вклад автора*

Большинство вопросов при достижении научных результатов, особенно связанных с проведением вычислений, решены автором самостоятельно: он разработал алгоритмы численного решения задач и программные коды, принял непосредственное и определяющее участие при постановке задач исследования и обсуждении полученных результатов.

### *Заключительная часть*

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 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Материалы диссертационной работы докладывались на международных и российских научных конференциях, а также на научных семинарах.

Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 25 работах, в том числе 9 – в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК РФ.

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 п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор **Куликов Юрий Матвеевич** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Отзыв составил доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Лаборатории «Механика многофазных сред» Института механики имени Р.Р. Мавлютова — обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИМех УФИЦ РАН) Урманчиев Саид Федорович.

450054, Россия, г. Уфа, Проспект Октября, 71,

телефон: (347) 235-52-55

e-mail: [said52@mail.ru](mailto:said52@mail.ru) ([said@anrb.ru](mailto:said@anrb.ru))

«22» апреля 2019 г.

  
Урманчиев С.Ф.

Подпись Урманчиева Саида Федоровича заверяю:

Ученый секретарь ИМех УФИЦ РАН

к.ф.-м.н.

  
Рафикова Г.Р.  
М.П.

450054, Россия, г. Уфа, Проспект Октября, 71,

телефон: (347) 235-52-55,

e-mail: [us\\_imech@anrb.ru](mailto:us_imech@anrb.ru)



Институт механики имени Р.Р. Мавлютова — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИМех УФИЦ РАН).

450054, Россия, г. Уфа, Проспект Октября, 71, (347) 235-52-55, [imran@anrb.ru](mailto:imran@anrb.ru)