



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

чл.-корр РАН


В.В. Сергеев

2019 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию 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

Актуальность темы диссертации. В диссертации Ю. М. Куликова расчетно-теоретическими методами исследуются вопросы гидродинамической устойчивости и турбулентности в течениях ньютоновской жидкости при сильной зависимости коэффициента вязкости от температуры. Несомненная актуальность работы обусловлена как необходимостью дальнейшего развития фундаментальных представлений о различных режимах движения термовязкой жидкости, так и множеством практических приложений – сильная зависимость вязкости от температуры присуща, в частности, продуктам переработки нефти, органическим и минеральным маслам, растворам полимеров, расплавам горных пород и т.д. Сегодня, опираясь на последние достижения в развитии методов вычислительной гидродинамики и вычислительных технологий, оказывается возможным обратиться к вопросам гидродинамики термовязких жидкостей, которые ранее не изучались или были проработаны недостаточно полно. Постановка задач в диссертации Ю.М.Куликова отвечает открывшимся недавно возможностям.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы. В диссертации сформулировано дифференциальное уравнение типа уравнения Орра-Зоммерфельда для функции тока возмущения в случае экспоненциальной зависимости вязкости от температуры среды и приведены интересные результаты численного решения данного уравнения. Для задачи о движении термовязкой жидкости в плоскопараллельном канале получена диаграмма устойчивости течения на плоскости

«число Рейнольдса–волновое число»; определены значения критического числа Рейнольдса потери устойчивости при изменении в широких пределах относительного перепада температур на противоположных стенках канала. Полученные результаты имеют ценность как в фундаментальном отношении, так и для решения практических задач, связанных с необходимостью учета характера течения термовязкой жидкости в неизотермических каналах.

Соискателем 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. Разработанный код может быть использован для проведения последующих фундаментальных исследований в данной области, а также расчетов практической направленности.

Автором диссертации для нескольких модельных конфигураций 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. Полученные результаты весьма интересны в общетеоретическом отношении; вместе с тем, они могут быть востребованы и практикой, например, при разработке уточненных методов предсказания интенсивности смешения в неизотермических потоках нефтепродуктов. Накопленный автором опыт проведения ресурсоемких численных экспериментов по оценке ключевых характеристик турбулентности в течениях термовязкой жидкости будет, несомненно, полезен для постановки последующих исследований в этой области

Научная новизна результатов работы состоит в том, что в ней:

- 1) получены новые данные о линейной устойчивости течения термовязкой жидкости в плоскопараллельном канале, включая возможный случай наличия точки перегиба в профиле скорости основного течения;
- 2) для модельного турбулентного течения Тейлора-Грина рассчитаны взаимные корреляционные функции давления и квадрата завихренности, а также взаимные корреляции их пульсационных компонент;
- 3) установлено, что при эволюции двойного вихревого слоя слабосжимаемой жидкости вклад дилатационной компоненты диссипации в энергетические характеристики течения сопоставим с общей диссипацией;
- 4) получены новые данные о развитии двумерных неустойчивостей в течении термовязкой жидкости под воздействием гармонических возмущений малой амплитуды на входе канал и показано, что наиболее интенсивные нелинейные процессы

перемешивания развиваются в окрестности точки перегиба профиля скорости основного течения;

5) в трехмерной постановке впервые рассмотрена задача о временной эволюции течения термовязкой жидкости между двумя параллельными стенками, подверженного в начальный момент воздействию случайных хаотических возмущений; для принятой модельной конфигурации, в виде кубической расчетной области с условиями периодичности по продольному и трансверсальному направлениям, получен и проанализирован обширный объем расчетных данных по характеристикам развивающегося турбулентного движения и условиям возникновения самоподдерживающейся турбулентности;

б) установлено, что интенсивность и ход процессов крупномасштабного перемешивания в двойном сдвиговом слое термовязкой жидкости определяется числом Рейнольдса и отношением динамических вязкостей жидкостей в смежных слоях; на плоскости данных параметров построена карта с областями, отвечающими различным сценариям процесса перемешивания.

Структура и общая характеристика работы. Диссертация состоит из введения, списка обозначений, пяти глав, заключения, списков литературы, рисунков и таблиц. Работа изложена на 227 страницах, содержит 118 рисунков и 19 таблиц; список литературы включает 245 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, освещена ее теоретическая и практическая значимость, указаны цели и конкретные задачи исследования, дана общая характеристика используемых для их решения методов, сформулированы основные научные результаты работы и положения, выносимые автором на защиту, перечислены публикации по теме диссертации, приведен список научных конференций и семинаров, на которых представлялись результаты работы. Приведен также обзор литературы, в рамках которого дано общее описание рассмотренных в диссертации задач и имеющихся по ним результатов предыдущих исследований.

В **первой главе** содержится обзор подходов к изучению устойчивости ламинарных течений, а также к моделированию турбулентных течений, дан обзор литературы по указанным вопросам. Описываются определение и классы термовязких жидкостей, постановки задач моделирования течения Тейлора–Грина и изучения процессов смешения в термовязкой жидкости.

Вторая глава посвящена исследованию устойчивости течения термовязкой жидкости в плоскопараллельном канале в рамках линейной теории. Дается вывод дифференциального уравнения, типа уравнений Орра–Зоммерфельда, с включением членов, отвечающих за учёт зависимости вязкости от температуры, проводится

численное решение полученного уравнения. Показывается, что в профиле скорости исходного течения при определённом значении безразмерного параметра, характеризующего перепад температур между противоположными стенками, возникает точка перегиба. Дан анализ диаграммы устойчивости и показано, что увеличение указанного параметра приводит к уменьшению критического числа Рейнольдса и расширению области неустойчивости в сторону длинноволновых возмущений по сравнению со случаем течения изотермической жидкости. Полученные результаты сопоставляются с данными, полученными в аналогичных расчётах других авторов.

В третьей главе описывается адаптация и реализация численной схемы КАБАРЕ применительно к численному решению уравнений Навье-Стокса в случае течений слабосжимаемой термовязкой жидкости. Показано, что расчёты разрывных течений при помощи созданного автором диссертации кода практически не дают осцилляций, при этом схема КАБАРЕ даёт малую численную дисперсию и диссипацию. Приводятся данные верификационных расчетов для задачи ламинарного течения в плоскопараллельном канале.

Четвёртая глава посвящена апробации разработанного автором кода на задачах перемешивания в изотермических сдвиговых течениях, включая ламинарные, переходные и турбулентные режимы движения. При рассмотрении задачи о развитии возмущений в двойном вихревом слое показано, что реализованный автором численный метод позволяет адекватно описывать основные характеристики двумерной турбулентности, что обусловлено отмечаемой автором малой диссипативностью схемы и её хорошей вихреразрешающей способностью. В задаче о затухании периодической «решётки» вихрей Тейлора–Грина показано, что при переходе к турбулентному режиму движения энергетический спектр течения демонстрирует приближение к асимптотике $-5/3$, но имеет место существенное демпфирование высокочастотной части спектра.

Пятая глава посвящена численному исследованию неизотермических течений термовязкой жидкости с применением разработанного автором кода. Рассматриваются следующие задачи: (1) двумерное течение в плоскопараллельном канале при наличии гармонических возмущений малой амплитуды на входе; (2) двумерное течение в двойном сдвиговом слое; (3) эволюционирующее во времени трехмерное напорное течение жидкости между двумя параллельными стенками, подверженное в начальный момент воздействию случайных возмущений небольшой интенсивности. По результатам исследования первой задачи показано, в частности, что наиболее интенсивные нелинейные процессы перемешивания развиваются в окрестности точки перегиба профиля скорости основного течения. Исследования по второй задаче показали, что интенсивность и ход процессов крупномасштабного перемешивания в двойном сдвиговом слое определяется числом Рейнольдса и отношением динамических вязкостей жидкостей в смежных слоях. Проведению расчетов в рамках третьей постановки

предшествовала разработка методики задания случайных возмущений с обеспечением соленоидальности поля вносимых пульсаций. Для принятой кубической расчетной области, с наложением условий периодичности по продольному и трансверсальному направлениям, выполнен значительный объем численных экспериментов, результаты которых позволяют оценить основные характеристики развивающегося турбулентного движения и условия возникновения самоподдерживающегося турбулентности.

В заключении перечислены основные результаты работы.

По диссертации имеется **ряд замечаний**.

1) 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 (2.51). В результате, однако, автор получает уравнения с отличающимся видом слагаемых, обусловленных зависимостью вязкости от температуры. Причина полученных расхождений не указывается.

2) 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 лишь для случая жидкостей с малым числом Прандтля, когда флуктуации температуры быстро рассеиваются. Для случая больших значений числа Прандтля, что типично, например, для масел, данное приближение может проводить к существенным погрешностям в определении критического числа Рейнольдса.

3) Описанная в главе 3 реализация схемы КАБАРЕ предназначена для численного решения уравнений 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.

4) Не слишком удачным является выбор кубической расчетной области для прямого численного моделирования напорного течения термовязкой жидкости, подверженного в начальный момент воздействию трехмерных случайных возмущений. Известно, например, что «каноническое» турбулентное течение изотермической несжимаемой жидкости в плоскопараллельном канале характеризуется наличием удлиненных 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.

5) Для той же задачи автор утверждает, в частности, что (п.5.3.15) «при относительно небольших среднemasсовых 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 трёхмерных расчетов. Подчеркнем, что данное замечание не затрагивает полученных оценок критического числа Рейнольдса перехода к режиму с развивающейся во времени турбулентностью и результатам ее численного моделирования.

6) Текст диссертации излишне многословен, перегружен рассуждениями общего характера. Нередко затрагиваются вопросы, не имеющие непосредственного отношения к тематике проведенного исследований. Например, непропорционально большое внимание уделяется истории развития методов исследования турбулентных течений, начиная от опытов 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 их постановок описаны, как правило, весьма скудно.

7) В тексте имеется большое число опечаток, а также стилистических погрешностей.

Высказанные 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 на российских и международных научных конференциях, ее основные результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК. Автореферат диссертации достаточно полно отражает ее содержание и основные результаты.

Таким образом, можно констатировать, что работа Ю. М. Куликова «Устойчивость и турбулентность течений термовязкой жидкости» удовлетворяет

требованиям пп. 9 и 10 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (ред. от 28.08.2017), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Куликов Юрий Матвеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.


Настоящий отзыв обсужден на заседании кафедры «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен» ФГАОУ ВО «СПбПУ» 10 апреля 2019 г., протокол № 6.

Смирнов Евгений Михайлович

Заведующий кафедрой «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен» СПбПУ,

д.ф.-м.н. (01.02.05), профессор

тел. (812) 552-6621, email: aero@phmf.spbstu.ru



Смирновский Александр Андреевич

доцент кафедры «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен» СПбПУ,

к.ф.-м.н. (01.04.07),

тел. (812) 552-6621, email: aero@phmf.spbstu.ru

