

На правах рукописи



НИЗАМОВА Аделина Димовна

**УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ТЕРМОВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ
В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С ЛИНЕЙНЫМ ПРОФИЛЕМ
ТЕМПЕРАТУРЫ**

Специальность 01.02.05 –

«Механика жидкости, газа и плазмы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Уфа – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Институте механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленном структурном подразделении Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Урманчиев Саид Федорович

Научный консультант: кандидат физико-математических наук, доцент
Киреев Виктор Николаевич

Официальные оппоненты: **Лежнин Сергей Иванович,**
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт теплофизики
им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения
Российской академии наук, главный научный
сотрудник
Топольников Андрей Сергеевич,
кандидат физико-математических наук, доцент
Общество с ограниченной ответственностью «РН-
БашНИПИнефть», эксперт отдела цифровой
трансформации комплексного управления активом

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Тюменский государственный университет»

Защита состоится 30 мая 2019 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.013.09 созданного на базе Башкирского государственного университета по адресу: 450076, г. Уфа, ул. З. Валиди, 32, физико-математический корпус, ауд. 400.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Башкирского государственного университета www.bashedu.ru/dissoverts.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент



Киреев Виктор Николаевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Устойчивость течения жидкости является актуальной проблемой гидродинамики. Хорошо известно, что существует два режима течения жидкостей: ламинарный и турбулентный. Характер течения зависит от числа Рейнольдса. При малых значениях этого числа наблюдается ламинарный режим течения. Однако, начиная с некоторого определенного значения, называемого критическим числом Рейнольдса, течение приобретает турбулентный характер. Критическое значение зависит от конкретного вида течения.

В настоящей работе была исследована устойчивость течения термовязких жидкостей с постоянной, линейной и экспоненциальной зависимостями вязкости от температуры. Понятие термовязкой жидкости введено в связи с необходимостью учета изменения вязкости от температуры в рассматриваемых процессах. Указанные выше зависимости были выбраны для возможности вычисления аналитических профилей скорости течения в канале и для сравнения полученных результатов каждой зависимости задачи устойчивости течения термовязких жидкостей.

Таким образом, актуальность темы исследования связана с необходимостью развития гидродинамической устойчивости течения термовязких жидкостей в каналах, встречающихся как в промышленных устройствах, так и в природе.

Целью настоящей работы является исследование гидродинамической устойчивости течения термовязких жидкостей с монотонными температурными зависимостями вязкости и поиск параметров, характеризующих режимы течений.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Найдены аналитически профили скоростей течения жидкости с линейной и экспоненциальной температурными зависимостями вязкости.
2. Получено обобщенное уравнение Орра-Зоммерфельда для исследования устойчивости течения термовязких жидкостей.
3. Исследованы спектры собственных значений, собственные функции, возмущения поперечной скорости течения жидкостей при изменении функциональной зависимости вязкости от температуры.
4. Построены области неустойчивости течения жидкостей в канале с подогревом сверху.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Влияние учета переменной вязкости жидкости на устойчивость течения.

2. Зависимость критического волнового числа от параметра термовязкости жидкости.

3. Зависимость критического числа Рейнольдса от параметра термовязкости жидкости.

4. Влияние вида зависимости вязкости жидкости от температуры на результаты решения задачи об устойчивости течения термовязкой жидкости.

5. Влияние вида зависимости вязкости жидкости от температуры на спектры собственных значений течения термовязких жидкостей.

Научная новизна:

1. Исследована устойчивость течения термовязких жидкостей с линейной и экспоненциальной зависимостями вязкости от температуры.

2. Обнаружена зависимость критического волнового числа от параметра термовязкости.

3. Представлена зависимость критического числа Рейнольдса от параметра термовязкости.

4. Показано, что на результат решения задачи об устойчивости течения термовязких жидкостей влияет выбранная температурная зависимость вязкости жидкости.

5. Установлена зависимость спектров собственных значений от значений параметра термовязкости.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные в работе результаты носят теоретический характер, являются развитием теории гидродинамической устойчивости и представляют интерес для специалистов в области гидродинамики. Полученные результаты также являются практически значимыми — позволяют изучать процессы и явления, происходящие в технологических аппаратах, используемых в различных отраслях промышленности. В частности, результаты устойчивости течения термовязкой жидкости могут быть использованы при проектировании систем отопления и промышленного кондиционирования и их эксплуатации.

Обоснованность и достоверность полученных результатов, содержащихся в диссертации, обеспечиваются: корректной постановкой задачи, которая основана на законах сохранения механики сплошных сред; выведенным обобщенным уравнением гидродинамической устойчивости течения термовязкой жидкости,

которое имеет в частном случае предельный переход и сводится к классическому уравнению Орра-Зоммерфельда; использованием математических методов их исследования; точностью вычислительного метода и удовлетворительным согласованием тестовых численных расчетов с известными решениями.

Апробация работы. Основные результаты диссертации, были представлены на следующих конференциях: The Summer Workshop on «Dynamics of Dispersed Systems» (Уфа, 22-28 июня 2014 г.); V международная научная школа молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах» (Москва, 25-28 ноября 2014 г.); Международная конференция «Потоки и структуры в жидкостях» (Калининград, 23-26 июня 2015 г.); XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 20-24 августа 2015 г.); Российская научно-техническая конференция «Мавлютовские чтения», посвященная 90-летию со дня рождения члена-корр. РАН, д.т.н., проф. Р.Р. Мавлютова (Уфа, 21-24 марта 2016 г.); VI Российская конференция «Многофазные системы: модели, эксперимент, приложения» и школы молодых ученых «Газовые гидраты – энергия будущего» (Уфа, 26-30 июня 2017 г.); Вторая Всероссийская летняя школа-конференция «Физико-химическая гидродинамика: модели и приложения» (Уфа, 25-30 июня 2018 г.); Международная школа-конференция для студентов, аспирантов, и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании» (Уфа, 16-20 октября 2018 г.); IX международная научная школа молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах» (Москва, 05-07 декабря 2018 г.).

Кроме того, результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах в ФГБНУ ОСП Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН.

Методы исследования. Для получения научных результатов в диссертационной работе использованы методы и уравнения механики сплошных сред. Разработанные программные продукты реализованы на языках Fortran 90 и MATLAB.

Личный вклад. Автор принимал участие в постановке задачи, разработке алгоритмов решения. Автором получено обобщенное уравнение Орра-Зоммерфельда; разработан программный код, основанный на псевдоспектральном методе по полиномам Чебышева; выполнен ряд вычислительных экспериментов и проведен анализ полученных результатов, которые были представлены в опубликованных работах.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 16 научных работах, 2 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация содержит введение, четыре главы и заключение. Полный объем диссертации составляет 111 страниц с 41 рисунком и 9 таблицами. Список литературы содержит 130 наименований.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю д.ф.-м.н., профессору Урманчееву С.Ф. за постановку задачи; научному консультанту к.ф.-м.н. Кирееву В.Н. за консультации при проведении численных экспериментов и анализ полученных результатов работы; д.ф.-м.н. Хабирову С.В. и д.ф.-м.н. Житникову В.П. за полезное обсуждение результатов работы, ценные советы и оказанную поддержку. Автор выражает признательность Налобинной Е.А. за огромный труд по редактированию и подготовке диссертации к печати.

Работа выполнена при содействии Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-41-020999-р_а) и по госзаданию на 2019-2022 гг. «Численные, аналитические и экспериментальные методы в многофазных, термовязких и микродисперсных системах газогидродинамики» (№ 0246-2019-0052).

Содержание работы

Во введении показана актуальность темы, выполняемой в диссертационной работе, поставлены цели, сформулированы научная новизна, обоснованность и достоверность результатов, значимость работы в различных областях науки и практики и представлена краткая структура работы.

В первой главе выполнен обзор литературы, посвященной изучению устойчивости течения жидкостей с различными видами зависимости вязкости от температуры. Представлено классическое уравнение Орра-Зоммерфельда для исследования устойчивости изотермического течения жидкости в плоском канале:

$$\varphi^{IV} - 2k^2 \varphi'' + k^4 \varphi - ik \operatorname{Re}[(u_0 - c)(\varphi'' - k^2 \varphi) - u_0'' \varphi] = 0,$$

с граничными условиями

$$\varphi(-1) = \varphi(1) = 0, \quad \varphi'(-1) = \varphi'(1) = 0,$$

где $\varphi(y)$ – амплитуда возмущения поперечной скорости; $u_0 = u_0(y)$ – профиль скорости в невозмущенном состоянии; i – мнимая единица; $c = w/k$ – фазовая скорость волны вдоль оси канала (собственное значение); w – частота; k – проекция волнового вектора на ось канала (волновое число); Re – число Рейнольдса.

Во второй главе получено обобщенное уравнение Орра-Зоммерфельда для изучения устойчивости течения термовязких жидкостей в плоском канале с неоднородным температурным полем, состоящее из системы двух обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \mu_0 \cdot [\varphi^{IV} - 2k^2 \varphi'' + k^4 \varphi] - ik \operatorname{Re}[(u_0 - c) \cdot (\varphi'' - k^2 \varphi) - u_0'' \varphi] + \\ + 2\mu_0' \cdot (\varphi''' - k^2 \varphi') + \mu_0'' (\varphi'' + k^2 \varphi) - ik [\mu_0' \cdot \theta \cdot u_0'' + 2 \cdot (\mu_0' \cdot \theta)' \cdot u_0'' + (\mu_0' \cdot \theta)'' \cdot u_0] = 0, \\ (\theta'' - k^2 \theta) - ik \operatorname{Pe}(u_0 - c) \theta - \operatorname{Pe} \varphi T' = 0, \end{cases}$$

с граничными условиями: $\varphi(-1) = \varphi(1) = 0$, $\varphi'(-1) = \varphi'(1) = 0$,

$$\theta(-1)e^{ik(x-ct)} = T_0(x, -1), \quad \theta(1)e^{ik(x-ct)} = T_0(x, 1, t) - 2,$$

$$\theta(y)e^{-ikct} \Big|_{x=0} = T_0(0, y) - (y+1), \quad \theta(y)e^{-i\frac{L}{H_m}kct} \Big|_{x=\frac{L}{H_m}} = T\left(\frac{L}{H_m}, y\right) - (y+1).$$

В третьей главе подробно описаны методы и подходы, используемые для численного решения обобщенного уравнения Орра-Зоммерфельда. На рис. 1 представлено сравнение тестовых расчетов с использованием разработанного программного кода для численного моделирования спектра собственных значений с известными численными решениями для изотермического течения жидкости. На рис. 2 приведено сравнение нейтральной кривой тестовых расчетов с результатами Скороходова С.Л. Программа выполняет вычисления с высокой степенью точности.

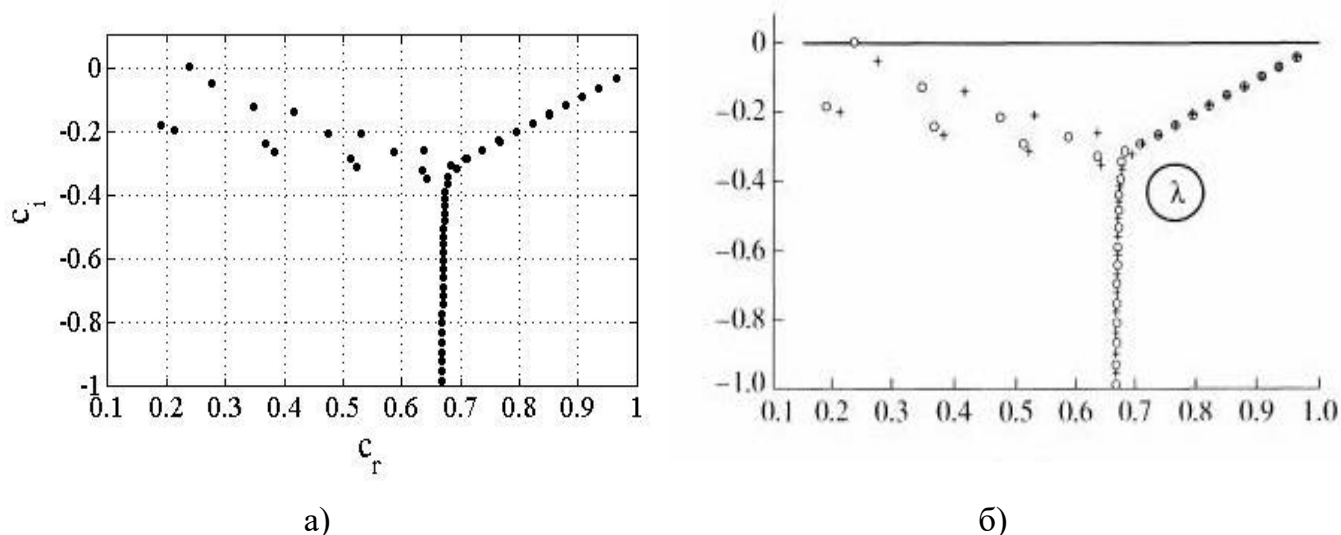


Рис. 1. Спектр собственных значений для изотермического течения жидкости, $\operatorname{Re} = 10^4$, $k = 1$: тест (а), результаты Скороходова С.Л. (б)

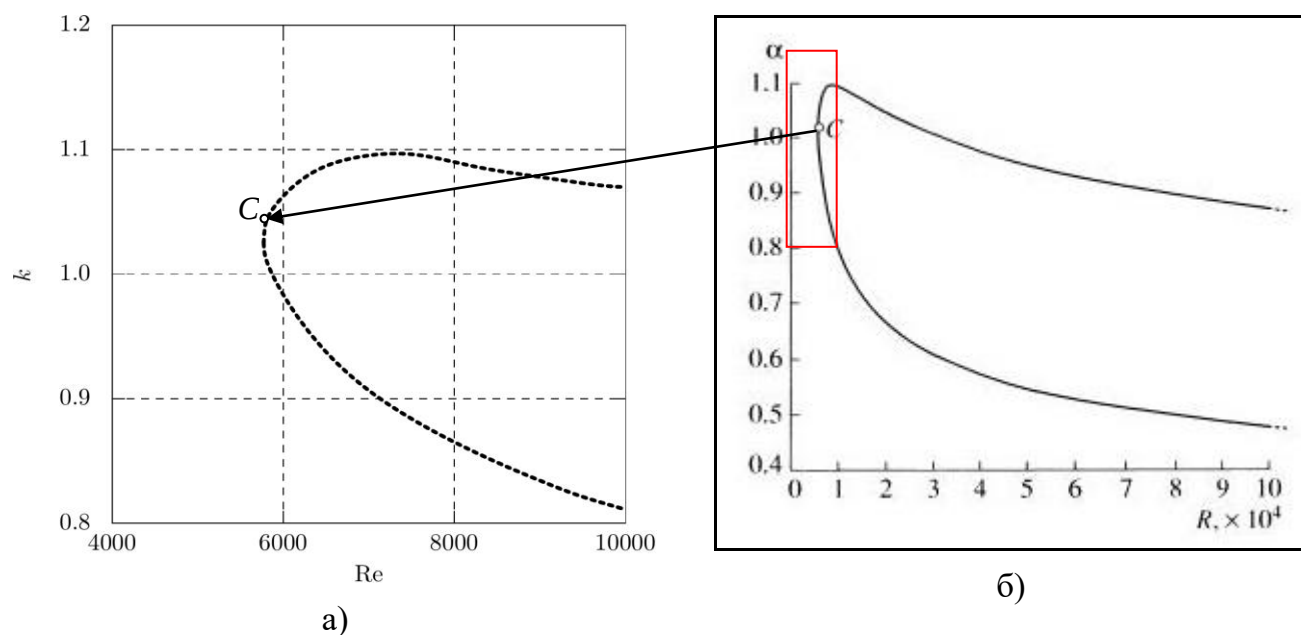


Рис. 2. Нейтральная кривая для изотермического течения жидкости:
тест (а), результаты Скороходова С.Л. (б)

В четвертой главе численно исследуется устойчивость течения термовязких жидкостей в плоском канале с неоднородным температурным полем (рис. 3). Рассмотрены задачи об устойчивости течения модельных жидкостей с безразмерными линейной $\mu_L(T) = 1 - \alpha_L T$ и экспоненциальной $\mu_E(T) = \exp(-\alpha_E T)$ зависимостями вязкости от температуры. Далее α_L и α_E будем называть параметрами термовязкости. Также рассмотрена задача об устойчивости течения реальной жидкости на примере водного раствора пропиленгликоля (45 %).

Поскольку и линейная и экспоненциальная зависимости показали качественно схожие результаты, то в автореферате приводятся результаты только для экспоненциальной зависимости вязкости. На рис. 4 показан график экспоненциальной зависимости и профиля скорости течения.

В работе поставлена задача о влиянии учета температурной зависимости вязкости на устойчивость течения жидкости. Спектры собственных значений модифицированного уравнения Орра-Зоммерфельда для нескольких значений параметра термовязкости α_E представлены на рис. 5. Анализ полученных результатов показывает, что при сделанных предположениях спектр собственных значений для малых значениях параметра α_E (рис. 5(а),(б)) качественно соответствует спектру собственных значений классического уравнения Орра-Зоммерфельда.

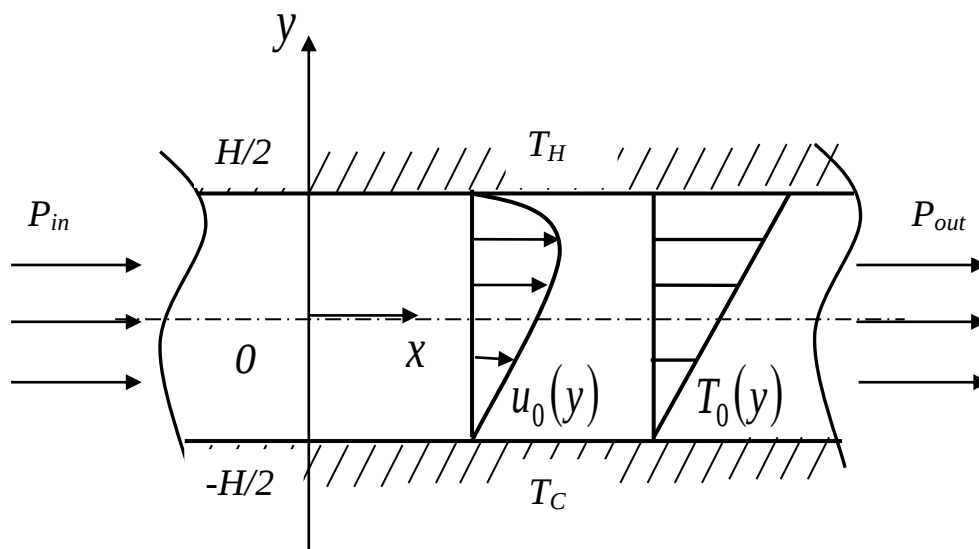


Рис. 3. Схема течения жидкости в канале

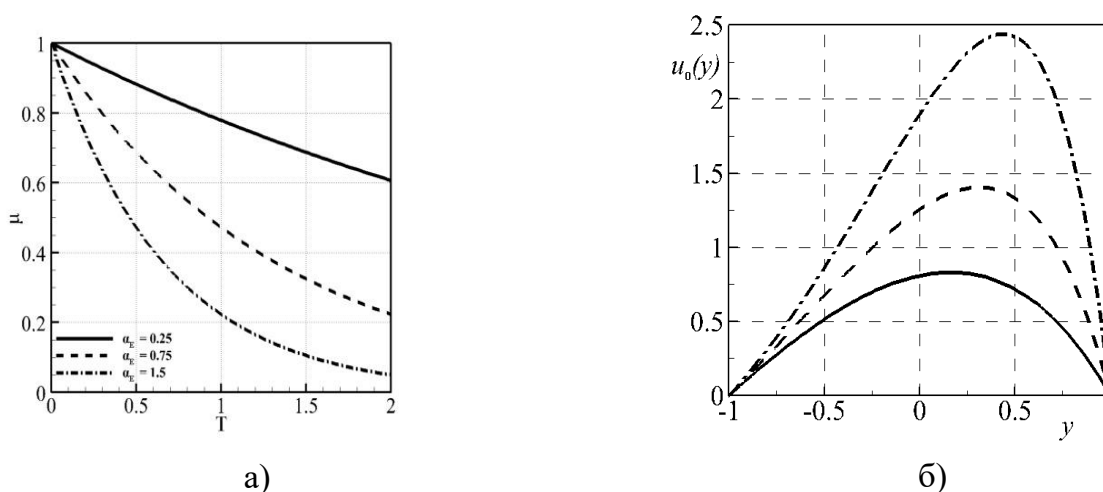


Рис. 4. Экспоненциальная зависимость вязкости от температуры:
распределение вязкости (а); профиль скорости (б)

Собственные значения приближаются к реальной оси, группируясь в одну вертикальную ветвь, и затем делятся на две отдельные ветви: левую и правую. При увеличении значения параметра α_E спектр собственных значений значительно изменяется: для достаточно больших значений параметра α_E нижняя вертикальная ветвь делится на несколько отдельных ветвей (рис. 5 (в)). Кроме того, существует одно собственное значение с положительной мнимой частью (рис. 5), что соответствует неустойчивому режиму течения при выбранных значениях числа Рейнольдса и волнового числа.

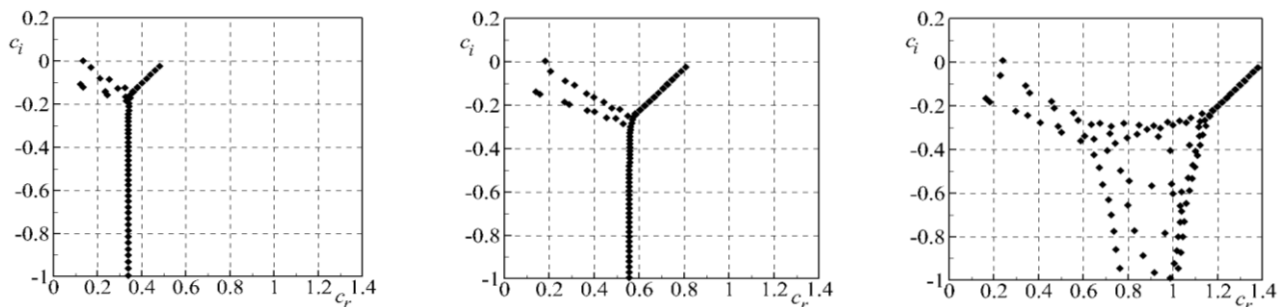


Рис. 5. Спектры собственных значений $Re = 10^4$, $k = 1$:

$\alpha_E = 0,01$ (а), $\alpha_E = 0,5$ (б), $\alpha_E = 1$ (в).

На рис. 6 представлены графики вещественной $Re \varphi$ и мнимой $Im \varphi$ частей собственной функции, соответствующей первому собственному значению c_1 . Рис. 7 является иллюстрацией вещественных частей возмущений поперечной скорости течения жидкости для c_1 и различных временных значений t . По полученным результатам видно, что при рассмотрении неустойчивого собственного значения c_1 с течением времени t возмущения скорости начинают расти, что приводит к турбулизации течения.

Вещественные части собственной функции, соответствующей второму собственному значению, показаны на рис. 8, а возмущения поперечной скорости – на рис. 9. Второе собственное значение является устойчивым и по графикам можно видеть, что с течением времени возмущения поперечной скорости затухают.

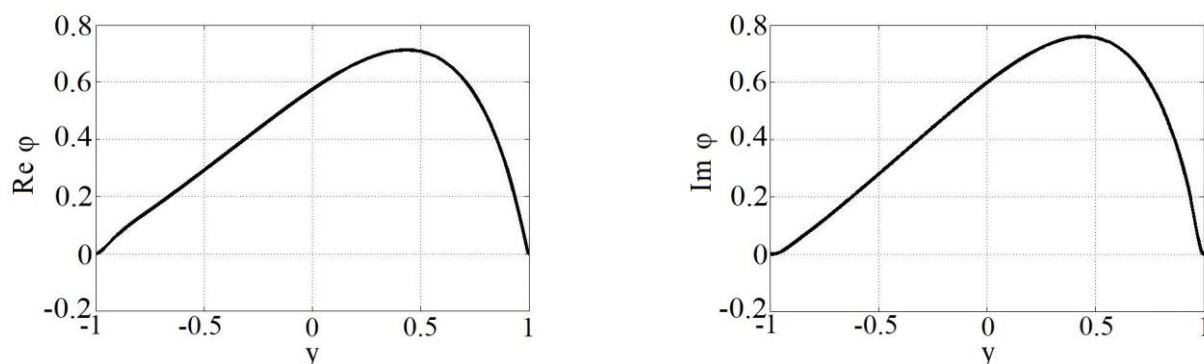


Рис. 6. Вещественная и мнимая части собственной функции первого собственного значения c_1 для жидкости с экспоненциальной зависимостью вязкости и параметрами

$Re = 10^4$, $k = 1$, $\alpha_E = 1.0$

На рис. 10 представлены нейтральные кривые для течения термовязкой жидкости для различных значений параметра α_E и изотермического течения жидкости с профилем Пуазейля. Область неустойчивости увеличивается с ростом значения параметра термовязкости α_E .

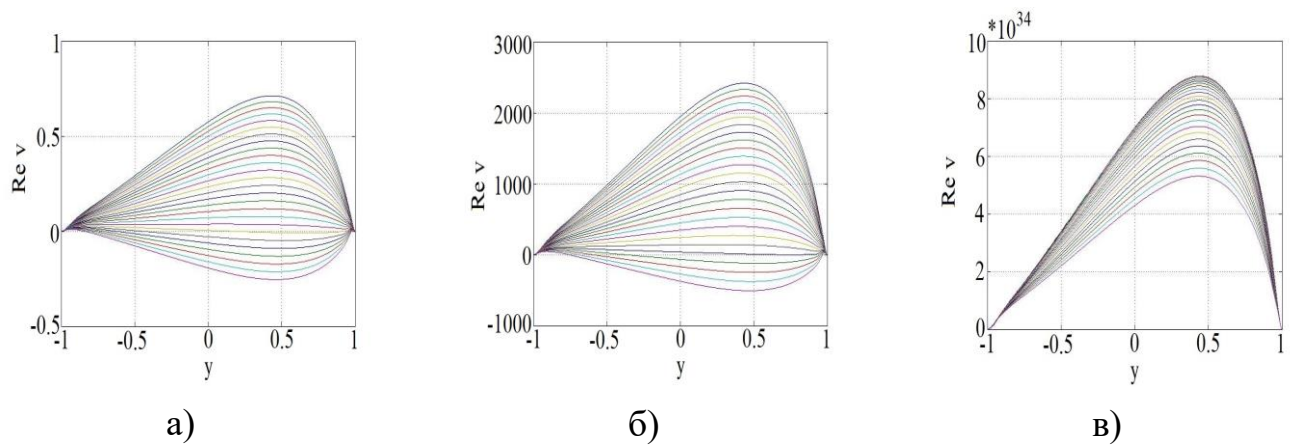


Рис. 7. Вещественная и мнимая части возмущений поперечной скорости первого собственного значения c_1 для жидкости с экспоненциальной зависимостью вязкости и параметрами $Re = 10^4$, $k = 1$, $\alpha_E = 1$: а) $t = 0$; б) $t = 10^3$; в) $t = 10^4$

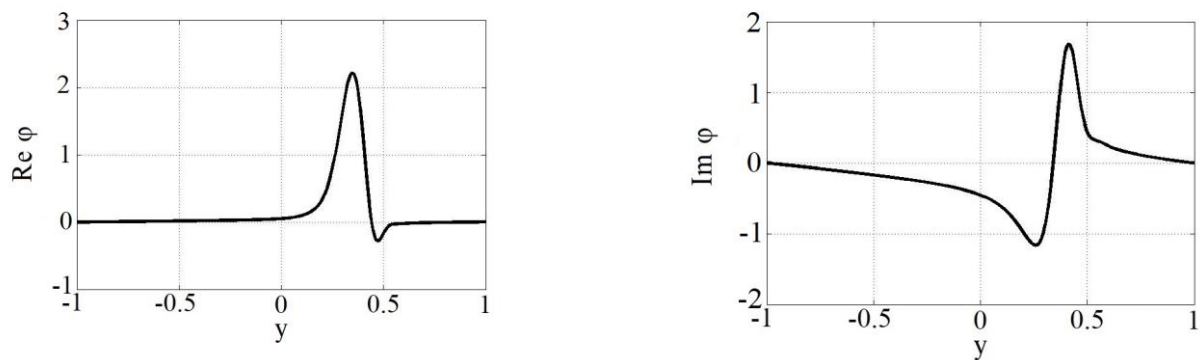


Рис. 8. Вещественная и мнимая части собственной функции второго собственного значения c_2 для жидкости с экспоненциальной зависимостью вязкости и параметрами $Re = 10^4$, $k = 1$, $\alpha_E = 1.0$

Изменение критического числа Рейнольдса от параметра термовязкости для течений термовязкой жидкости представлено на рис. 11.

Аналогично результатам для жидкости с линейной зависимостью вязкости можно видеть, что при увеличении значений параметра термовязкости жидкости критическое число Рейнольдса стремится в сторону меньших значений. На рис. 12 показано изменение критического волнового числа от параметра термовязкости. Критическое волновое число возрастает с увеличением параметра термовязкости. Изменение критического волнового числа и критического числа Рейнольдса от параметра термовязкости для течений жидкости с постоянной вязкостью и термовязкой жидкости представлено на рис. 13.

В качестве незамерзающей жидкости широко применяются водные растворы гликолей – этиленгликоля $C_2H_6O_2$ и пропиленгликоля $C_3H_8O_2$.

Повышенная вязкость водного раствора пропиленгликоля в зоне отрицательных рабочих температур приводит к значительному возрастанию гидравлических потерь на трение в трубопроводах и на преодоление гидравлических сопротивлений во всех узлах системы охлаждения и промышленного кондиционирования.

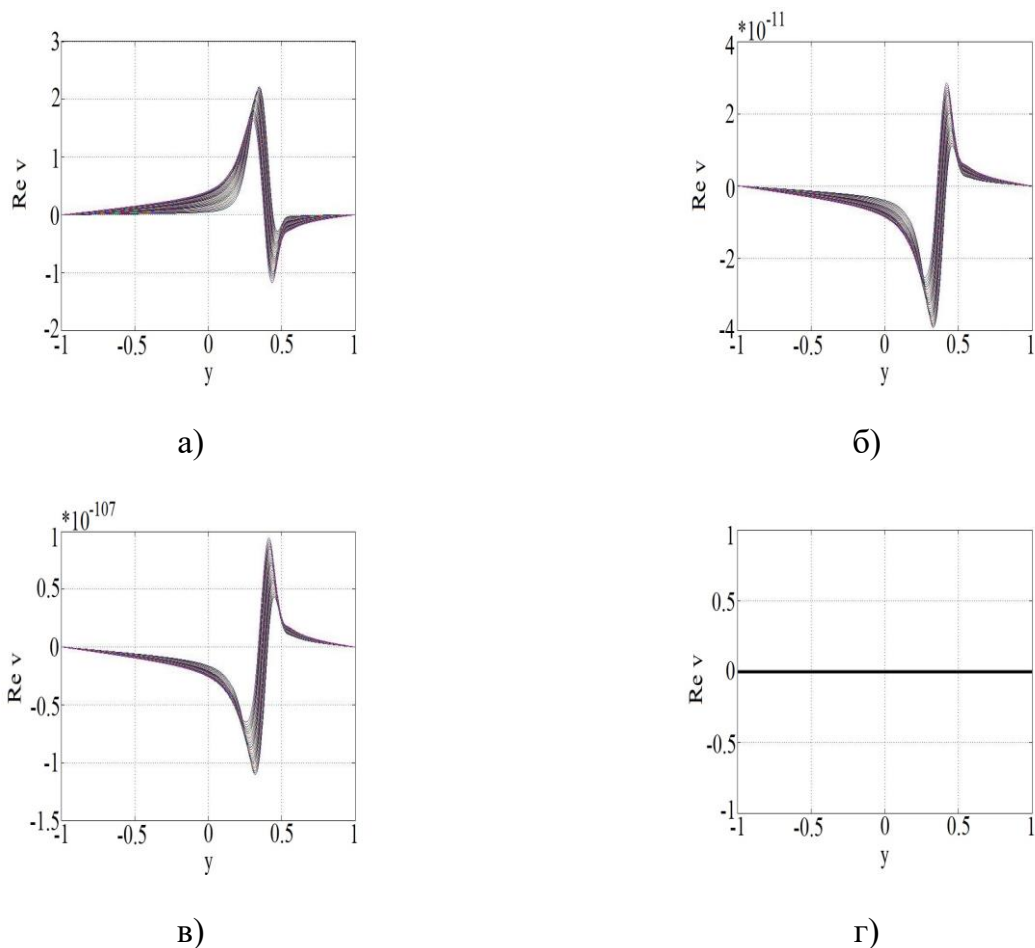


Рис. 9. Вещественная и мнимая части возмущений поперечной скорости второго собственного значения c_2 для жидкости с экспоненциальной зависимостью вязкости и параметрами $Re = 10^4$, $k = 1$, $\alpha_E = 1$: а) $t = 0$; б) $t = 10^3$; в) $t = 10^4$; г) $t = 10^5$

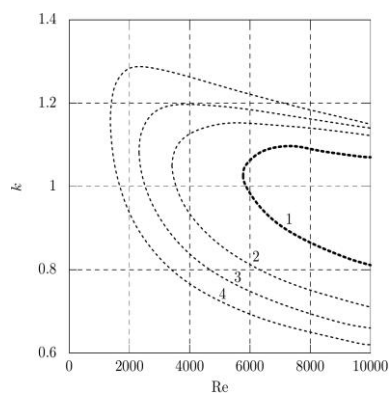


Рис. 10. Нейтральные кривые изотермического течения жидкости (1) и течений термовязкой жидкости: $\alpha_E = 0.25$ (2), $\alpha_E = 0.5$ (3), $\alpha_E = 0.75$ (4)

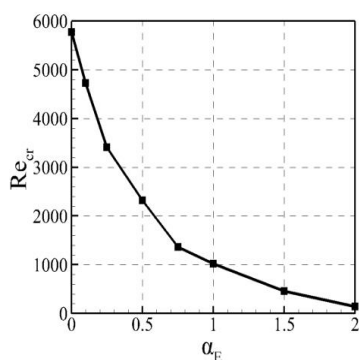


Рис. 11. Изменение критического числа Рейнольдса от параметра термовязкости

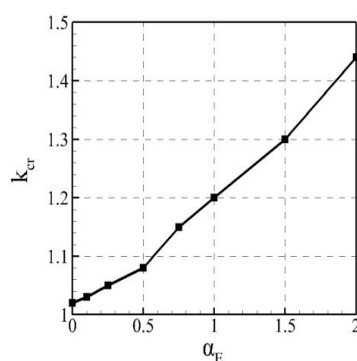


Рис. 12. Изменение критического волнового числа от параметра термовязкости

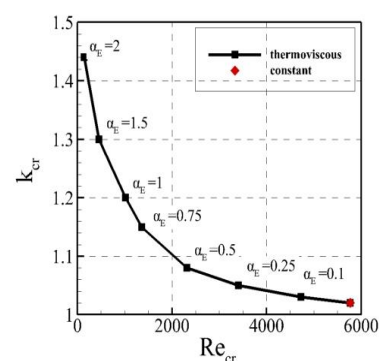


Рис. 13. Изменение критических чисел волнового и Рейнольдса от α_E

Значительное снижение теплоемкости раствора пропиленгликоля требует повышения скорости циркуляции тепло-хладоносителя в системе или других технических решений для обеспечения передачи (приема) необходимой тепловой мощности (энергии). Все эти факторы, как следствие, приведут к особым исключительным ситуациям (условиям) при эксплуатации инженерных систем в различных климатических условиях. И их следует учесть при проектировании и эксплуатации систем отопления и промышленного кондиционирования.

График зависимости вязкости от температуры для 45% водного раствора пропиленгликоля представлен на рис. 14.

Рассмотрим два интервала температуры: I – от -10°C до 20°C ; II – от 60°C до 100°C .

По рис. 15(а) можно сказать, что на I промежутке происходит изменение вязкости примерно в 5 раз, в отличие от II промежутка (рис. 15(б)) – изменение примерно в 2 раза. Уравнения аппроксимирующих функций и величины достоверности аппроксимации приведены на графиках (рис. 15).

Определим профили скорости течения в невозмущенном состоянии для каждого вида зависимости вязкости от температуры (рис. 16).

На рис. 17 изображены спектры собственных значений для сравнения рассматриваемых зависимостей вязкости жидкости от температуры, на интервале I – $Re = 1563$, $k = 1.05$, на интервале II – $Re = 3200$, $k = 1$.

По представленным графикам видно, что спектры качественно схожи для рассматриваемых интервалов.

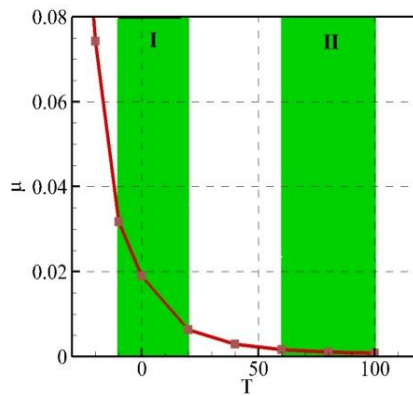
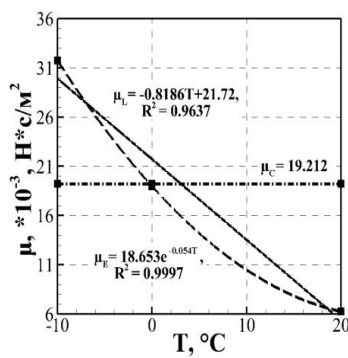
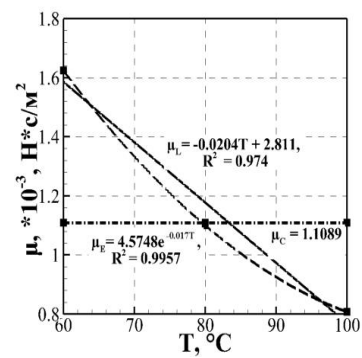


Рис. 14. Аппроксимация зависимости вязкости 45% водного раствора пропиленгликоля от температуры на интервалах I и II

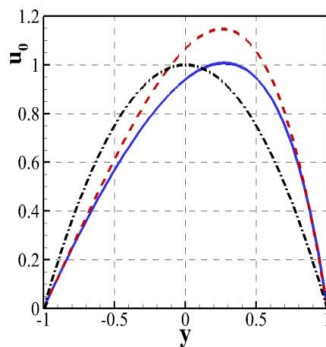


а)

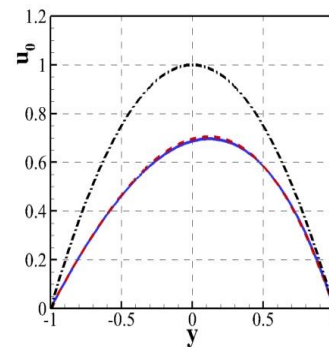


б)

Рис. 15. Аппроксимация зависимости вязкости 45% водного раствора пропиленгликоля от температуры: интервал I (а), интервал II (б)



а)



б)

Рис. 16. Профили скорости для постоянной (штрих-пунктирная), линейной (сплошная) и экспоненциальной (штриховая) зависимостей вязкости на температурных интервалах I (а) и II (б)

Для линейной и экспоненциальной зависимостей вязкости увеличивается количество собственных значений, т.е. больше нетривиальных решений задачи (ненулевые собственные функции) и, таким образом, появление дополнительных

возмущений поперечной скорости течения. Существенное сходство спектров также можно наблюдать на интервале II для линейной и экспоненциальной сходимости.

Нейтральные кривые течения водного раствора пропиленгликоля (45%) для двух рассмотренных выше диапазонов температур представлены на рис. 18.

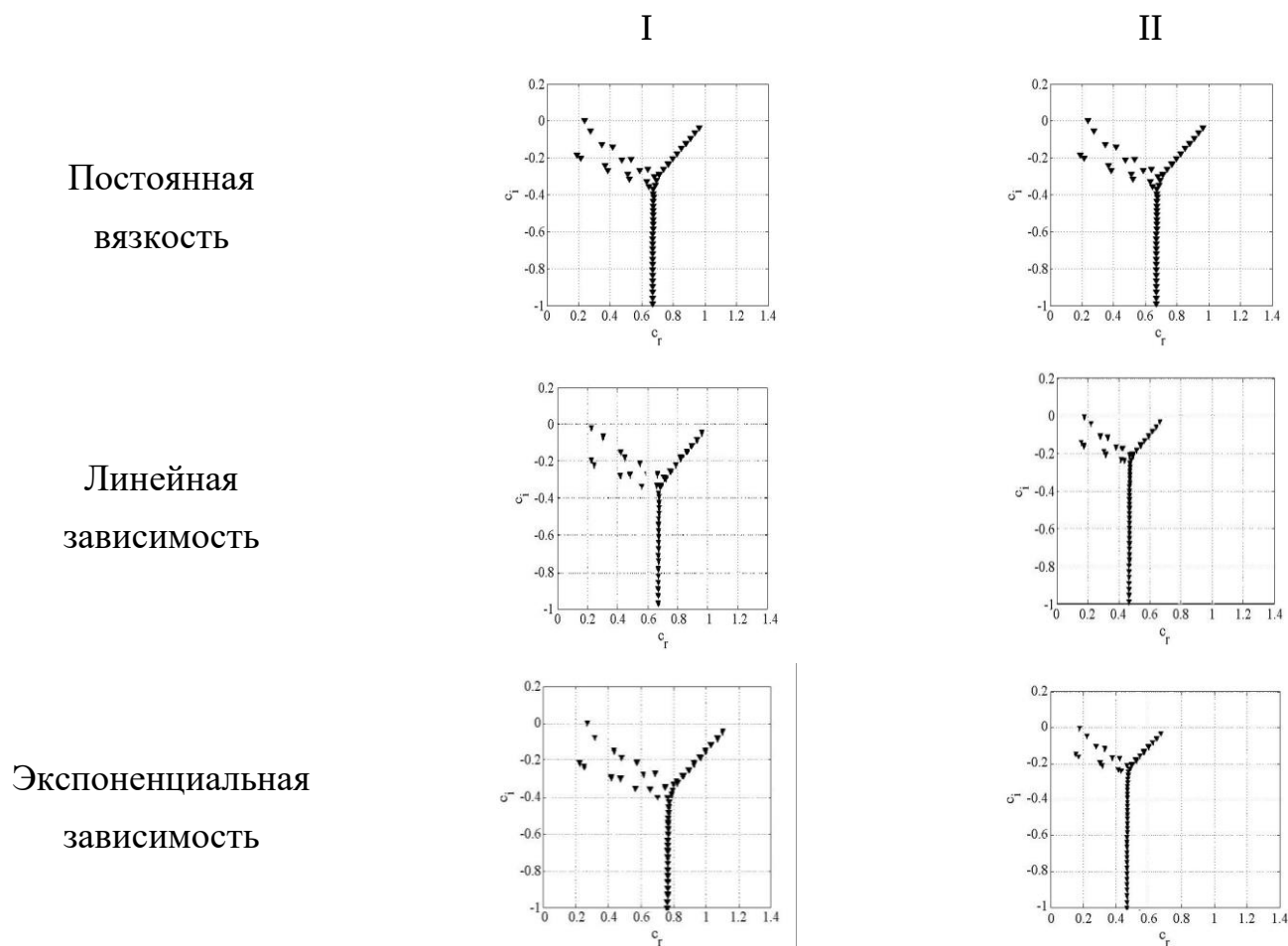


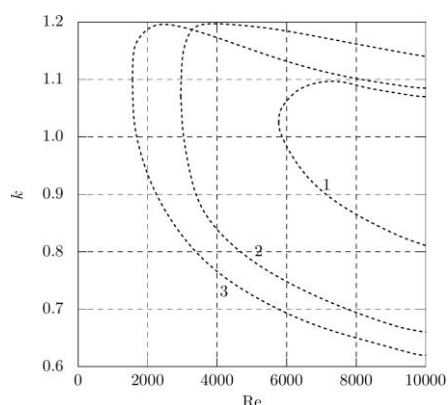
Рис. 17. Спектры собственных значений для различных температурных зависимостей вязкости

Из полученных результатов видно, что для постоянной вязкости критическое число Рейнольдса Re_{cr} равно 5772 для любого температурного интервала. Однако, при рассмотрении температурной зависимости вязкости существенное значение имеет конкретный температурный интервал. Например, для интервала температуры от -10°C до 20°C :

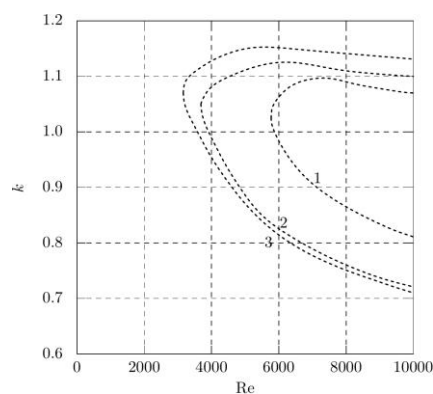
- линейная зависимость – $Re_{cr} = 2950$ при $k = 1.07$;
- экспоненциальная зависимость – $Re_{cr} = 1563$ при $k = 1.12$;

а для диапазона температуры от 60°C до 100°C :

- линейная зависимость – $Re_{cr} = 3684$ при $k = 1.05$;
- экспоненциальная зависимость – $Re_{cr} = 3158$ при $k = 1.07$.



а)



б)

Рис. 18. Нейтральные кривые течения водного раствора пропиленгликоля (45%) на интервалах температур: I (а), II (б), жидкость с постоянной вязкостью (1), термовязкая жидкость с линейной (2) и экспоненциальной (3) зависимостями вязкости

Для линейной и экспоненциальной зависимостей вязкости в первом случае критические числа Рейнольдса имеют значительные расхождения, во втором случае – близки по значениям. Объясняется это тем, что в первом случае зависимость вязкости от температуры и профиль скорости в невозмущенном состоянии для экспоненциальной функции удовлетворительно описывают физический процесс течения жидкости.

Таким образом, для любой жидкости можно провести аналогичные рассуждения и выявить условия потери устойчивости течения.

В заключение нужно отметить, что при анализе устойчивости течения реальных жидкостей необходимо использовать наиболее оптимальную аппроксимацию зависимости вязкости от температуры.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в работе и выносимые на защиту:

1. Показано, что учет температурной зависимости вязкости жидкости влияет на устойчивость течения в канале с неоднородным температурным полем.
2. Установлено, что критическое волновое число зависит от параметра термовязкости и с его ростом увеличивается, при этом для течения термовязкой жидкости критическое волновое число всегда больше, чем для течения жидкости с постоянной вязкостью. Для малых значений параметра термовязкости критическое волновое число совпадает с критическим значением для течения жидкости с постоянной вязкостью.

3. Показано, что критическое число Рейнольдса зависит от параметра термовязкости жидкости и уменьшается с увеличением значения данного параметра. Для малых значений параметра термовязкости критическое число Рейнольдса совпадает с критическим значением для изотермического течения жидкости.
4. Обнаружено, что на результат решения задачи об устойчивости течения жидкости с температурной зависимостью вязкости влияет выбранная модель зависимости. Для модели реальной жидкости рассмотрено два интервала изменения температуры. На первом интервале для экспоненциальной и линейной аппроксимаций температурной зависимости вязкости жидкости области неустойчивости пересекаются. На втором интервале – области неустойчивости не имеют пересечений.

Основные публикации автора по теме диссертации

Работы, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Низамова А.Д., Киреев В.Н., Урманчиев С.Ф. Об устойчивости ламинарного режима течения термовязких жидкостей // Вестник ТюмГУ. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2015. Т. 1, № 2. С. 104-111.
2. Низамова А.Д., Киреев В.Н., Урманчиев С.Ф. Определение критического числа Рейнольдса в задаче об устойчивости течения термовязкой жидкости // Вестник БашГУ. 2018. Т. 23, № 3. С. 627-634.

В других изданиях:

3. Kireev V.N., Nizamova A.D., Urmancheev S.F. The hydraulic resistance of thermoviscous liquid flow in a plane channel with a variable cross-section // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2019. № 1158. 032014. doi:10.1088/1742-6596/1158/3/032014.
4. Низамова А.Д., Киреев В.Н., Урманчиев С.Ф. О влиянии зависимости вязкости от температуры на устойчивость течения жидкости // Известия УНЦ РАН. 2014. № 4. С. 12-16.
5. Kireev V.N., Nizamova A.D., Urmancheev S.F. Preliminary numerical results on hydrodynamic stability of thermoviscous liquid flows // Abstracts of International Conference “MOGRAN XVII: new trends in investigation of mathematical models”. Cadiz, Spain, September 8-12, 2014. 1 p.

6. Низамова А.Д., Киреев В.Н., Урманчиев С.Ф. К численному анализу гидродинамической устойчивости термовязкой жидкости // Тезисы докладов Всероссийской конференции XXXI Сибирский теплофизический семинар, посвященный 100-летию со дня рождения академика С.С. Кутателадзе. Новосибирск, 17-19 ноября 2014 г. С. 44.
7. Nizamova A.D., Kireev V.N., Urmancheev S.F. The Influence of Temperature Dependence of Viscosity on Stability of Liquid Flows // School materials of Fifth International Scientific School for Young Scientists «Waves and vortices in complex media». Moscow, November 25-28, 2014. Pp. 69-71.
8. Низамова А.Д., Киреев В.Н., Урманчиев С.Ф. Численный анализ устойчивости течения термовязкой жидкости // Тезисы докладов XI Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Казань, 20-24 августа 2015 г. С. 1778-1780.
9. Низамова А.Д., Киреев В.Н., Урманчиев С.Ф. Некоторые точные решения стационарной системы уравнений для стратифицированного течения двух термовязких жидкостей // Вестник УГАТУ. 2016. Т. 4. С. 90-95.
10. Nizamova A.D., Kireev V.N., Urmancheev S.F. Instabilities in stratified two thermoviscous liquids flow in a plane channel // ICMF-2016 – 9th International Conference on Multiphase Flow. Firenze, Italy, May 22 -27, 2016. 5 p.
11. Kireev V.N., Nizamova A.D., Urmancheev S.F. Hydrodynamic Instability of thermoviscous liquid in a plane channel // Proceedings of the 8th International Scientific School for Young Scientists «Waves and vortices in complex media». Moscow, November 7-9, 2017. Pp. 221-224.
12. Низамова А.Д., Киреев В.Н., Урманчиев С.Ф. Определение критического числа Рейнольдса в задаче об устойчивости течения термовязкой жидкости // Материалы Второй Всероссийской летней школы-конференции «Физико-химическая гидродинамика: модели и приложения». г. Уфа, 25-30 июня 2018 г. С. 79.
13. Kireev V.N., Nizamova A.D., Urmancheev S.F. On the change of the critical Reynolds number as a function of the properties of a thermoviscous liquid // Proceedings of International conference «Fluxes and Structures in Fluids», Vladivostok, august 08-10, 2018. Pp. 156-158.

14. Низамова А.Д., Киреев В.Н., Урманчеев С.Ф. Гидродинамическая устойчивость течения термовязкой жидкости // Тезисы докладов IX Всероссийской конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и механики» с международным участием, посвященной памяти академика А.Ф. Сидорова, Абрау-Дюрсо, 03-08 сентября 2018г. С. 59-60.
15. Низамова А.Д., Киреев В.Н., Урманчеев С.Ф. Спектры собственных значений и характеристики течения термовязкой жидкости // Сборник тезисов научных слушаний «Современные проблемы механики и математики» г. Москва, 15-16 ноября 2018 г. С. 73-74.
16. Низамова А.Д., Киреев В.Н., Урманчеев С.Ф. Об устойчивости течения теплоносителя в плоском канале // Сборник тезисов 9-ой международной научной школы молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах» г. Москва, 05-07 декабря 2018 г. С. 128-131.

НИЗАМОВА Аделина Димовна

**УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ТЕРМОВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ
В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С ЛИНЕЙНЫМ ПРОФИЛЕМ
ТЕМПЕРАТУРЫ**

Специальность 01.02.05 –
«Механика жидкости, газа и плазмы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 19.04.2019 г. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать ризографическая. Тираж 100 экз. Заказ №
Гарнитура «TimesNewRoman». Отпечатано в типографии
«ПЕЧАТНЫЙ ДОМЪ» ИП ВЕРКО.
Объем 1,1 п.л. Уфа, Карла Маркса, 12, корп. 5/1,
т/ф: 27-27-600, 27-29-123