ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.237.01, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РАН» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 10 апреля 2025 г. № 4

О присуждении Семисалову Борису Владимировичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Моделирование течений вязкоупругих полимерных сред и слаботурбулентных процессов в бозе-газах на основе дробно-рациональных приближений и алгоритмов без насыщения» по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите 09.01.2025 (протокол заседания № 1/пз) диссертационным советом 24.1.237.01, созданным на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», 125047, г. Москва, Миусская пл., д. 4. Диссертационный совет утверждён приказом Минобрнауки России № 105/нк от 11 апреля 2012 года.

Соискатель Семисалов Борис Владимирович, 1987 года рождения, в 2010 г. получил степень магистра математики по направлению «Математика» в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный университет» (в настоящее время Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»).

Диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук «Математическое моделирование в задачах переноса заряда в полупроводниковых кремниевых устройствах» защитил в 2011 году в диссертационном совете ДМ 212.179.07 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского».

Соискатель работает в должности старшего научного сотрудника в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт математики им. С.Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук» (ИМ СО РАН) в лаборатории вычислительных проблем задач математической физики.

Диссертация выполнена ИМ СО РАН в лаборатории вычислительных проблем задач математической физики.

Научный консультант – Ткачёв Дмитрий Леонидович, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией вычислительных проблем задач математической физики ИМ СО РАН.

Официальные оппоненты:

Булатов Михаил Валерьянович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории дифференциальных уравнений и управляемых систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт динамики

систем и теории управления им. В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук», г. Иркутск,

Дьяченко Александр Иванович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук», г. Черноголовка,

Пышнограй Григорий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник научного управления Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «**Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева** Сибирского отделения Российской академии наук» (ИГиЛ СО РАН), г. Новосибирск, в своем **положительном** отзыве, подписанном доктором физико-математических наук, доцентом, ведущим научным сотрудником лаборатории прикладной и вычислительной гидродинамики **Мошкиным Николаем Павловичем** и доктором физико-математических наук, профессором, член-корреспондентом РАН, главным научным сотрудником лаборатории прикладной и вычислительной гидродинамики **Пухначёвым Владиславом Васильевичем** и утверждённом доктором физико-математических наук, директором ИГиЛ СО РАН **Ерманюком Евгением Валерьевичем**, отметила высокую ценность методов, предложенных в диссертации Семисалова Бориса Владимировича для решения двух прикладных задач: 1) моделирование пуазейлевских течений полимерной жидкости, их установления и потери устойчивости; 2) моделирование волновых взаимодействий в физических системах, описываемых нелинейным уравнением Шрёдингера. В отзыве ведущей организации указано, что аккуратный учёт особенностей, возникающих у решений рассмотренных задач, позволил получить ряд новых результатов. Наиболее значимые результаты, касающиеся первой задачи, состоят в следующем: 1) получены зависимости свойств стационарных течений (распределений скорости и температуры жидкости, потока и других свойств) от параметров, описывающих реологию, микроструктуру, геометрию и внешние воздействия на жидкость; 2) указаны значения параметров, обеспечивающие установление течений и охарактеризован эффект переключения предельных решений нестационарной задачи между ветвями стационарных решений; 3) получены точные стационарные решения осесимметричной задачи и сформулировано условие потери устойчивости соответствующих течений. Результаты, полученные в диссертации при исследовании второго приложения, имеют большое значение для описания эффектов, возникающих в турбулентных режимах течения жидкостей и газов, когда взаимодействия волн являются достаточно слабыми. На основе полученных результатов можно заключить, что теория волновой турбулентности действительно адекватно описывает перенос энергии и других инвариантов между разномасштабными возмущениями на больши́х интервалах по времени. Существенное значение, как для теории, так и для организации экспериментальных работ, имеют логарифмическая поправка классического спектра Колмогорова–Захарова, полученная в диссертации для прямого каскада энергии бозе-газа, а также найденные автомодельные режимы эволюции волнового спектра. Диссертационная работа Семисалова Бориса Владимировича «Моделирование течений вязкоупругих полимерных сред и слаботурбулентных процессов в бозе-газах на основе дробно-рациональных приближений и алгоритмов без насыщения» выполнена на высоком научном уровне, в ней поставлены и решены научные проблемы, имеющие важное социально-экономическое и хозяйственное значение. Совокупность положений диссертационной работы можно квалифицировать как

научное достижение в области математического моделирования. Диссертация Семисалова Бориса Владимировича является законченным научным исследованием, которое полностью соответствует паспорту специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» и требованиям Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения учёных степеней». Семисалов Борис Владимирович вполне заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Соискатель имеет 117 опубликованных работ (включая тезисы конференций), в том числе по теме диссертации опубликованы 19 работ в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК либо входящих в международные базы данных Web of Science (WOS) и Scopus. Соискатель имеет 7 личных публикаций по теме диссертации (без соавторов). При выполнении диссертационного исследования разработаны и реализованы 3 комплекса программ для ЭВМ, для которых получены свидетельства о государственной регистрации. Сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны.

Научные работы соискателя, в которых изложены результаты диссертации:

1. ***Семисалов Б.В.****, Медведев С.Б., Назаренко С.В., Федорук М.П.* Алгоритм решения четырехволнового кинетического уравнения в задачах волновой турбулентности // ЖВМиМФ. 2024. Т. 64, №2. С. 364–386. (Перечень ВАК, WOS, Scopus)
2. ***Семисалов Б.В.*** О точных решениях типа Пуазейля для течений вязкоупругой полимерной жидкости в цилиндрическом канале // Прикладная механика и техническая физика. 2023. Т. 64, №4. С. 139–151. (Перечень ВАК, WOS, Scopus)
3. ***Семисалов Б.В.*** Об одном сценарии перехода к турбулентности при течении полимерной жидкости в цилиндрическом канале // Мат. моделирование. 2023. Т. 35, №11. С. 62–78. (Перечень ВАК, Scopus)
4. *Zhu Y.,* ***Semisalov B.V.****, Krstulovic G., Nazarenko S.V.* Direct and Inverse Cascades in Turbulent Bose–Einstein Condensates // Phys. Rev. Lett. 2023. Vol. 130, Is. 13. Art. № 133001. (WOS Q1, Scopus)
5. *Zhu Y.,* ***Semisalov B.V.****, Krstulovic G., Nazarenko S.V.* Self-similar evolution of wave turbulence in Gross–Pitaevskii system // Phys. Rev. E. 2023. Vol. 108, No. 6. Art. № 064207. (WOS Q1, Scopus)
6. *Блохин А.М.,* ***Семисалов Б.В.*** Нахождение стационарных течений пуазейлевского типа для несжимаемой полимерной жидкости методом установления // ЖВМиМФ. 2022. Т. 62, № 2. С. 305–319. (Перечень ВАК, WOS, Scopus)
7. ***Семисалов Б.В.*** Об одном подходе к численному решению задач Дирихле произвольной размерности // СибЖВМ. 2022. Т. 25, №1. С. 77–95. (Перечень ВАК, WOS, Scopus)
8. ***Семисалов Б.В.*** Применение дробно-рациональных интерполяций для решения краевых задач с особенностями // Вестн. ЮУрГУ ММП. 2022. Т. 15, № 4. С. 5–19. (WOS, Scopus)
9. *Zhu Y.,* ***Semisalov B.V.****, Krstulovic G., Nazarenko S.V.* Testing wave turbulence theory for the Gross–Pitaevskii system // Phys. Rev. E. 2022. Vol. 106, No. 1. Art. № 014205. (WOS Q1, Scopus)
10. ***Semisalov B.V.****, Belyaev V.A., Bryndin L.S., Gorynin A. G., Blokhin A.M., Golushko S.K., Shapeev V. P.* Verified simulation of the stationary polymer fluid flows in the channel with elliptical cross-section // Applied Mathematics and Computation. 2022. Vol. 430. Art. № 127294. (WOS Q1, Scopus)
11. ***Semisalov B.V.****, Grebenev V.N., Medvedev S.B., Nazarenko S.V.* Numerical analysis of a self-similar turbulent flow in Bose–Einstein condensates // Communications in

Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2021. Vol. 102. Art. № 105903. (WOS Q1, Scopus)

12. *Блохин А.М.,* ***Семисалов Б.В.*** Расчёт стационарных неизотермических МГД течений полимерной жидкости в каналах с внутренними нагревательными элементами // Сиб. журн. индустр. мат. 2020. Т. 23, №2. С. 17–40. (Перечень ВАК, Scopus)
13. *Блохин А.М., Круглова Е.А.,* ***Семисалов Б.В.*** Оценка двух компонент погрешности численного решения задачи о неизотермическом течении полимерных растворов между двумя соосными цилиндрами // ЖВМиМФ. 2018. Т. 58, № 7. С. 1099–1115. (Перечень ВАК, WOS, Scopus)
14. ***Семисалов Б.В.*** Разработка и анализ быстрого псевдоспектрального метода решения нелинейных задач Дирихле // Вестн. ЮУрГУ ММП. 2018. Т. 11, № 2. С. 123–138. (WOS, Scopus)
15. *Блохин А.М., Круглова Е.А.,* ***Семисалов Б.В.*** Стационарные неизотермические течения несжимаемой вязкоупругой полимерной жидкости между двумя соосными цилиндрами // ЖВМиМФ. 2017. Т. 57, № 7. С. 1184–1197. (Перечень ВАК, WOS, Scopus)
16. ***Семисалов Б.В.*** Быстрый нелокальный алгоритм решения краевых задач Неймана–Дирихле с контролем погрешности // Выч. мет. и программирование. 2016. Т. 17, № 4. С. 500–522. (Перечень ВАК)
17. *Блохин А.М.,* ***Семисалов Б.В.****, Шевченко А.С.* Стационарные решения уравнений, описывающих неизотермические течения несжимаемой вязкоупругой полимерной жидкости // Мат. моделирование. 2016. Т. 28, № 10. С. 3–22. (Перечень ВАК)
18. ***Семисалов Б. В.*** Нелокальный алгоритм поиска решений уравнения Пуассона и его приложения // ЖВМиМФ. 2014. Т. 54, № 7. С. 1110–1135. (Перечень ВАК)
19. *Блохин А.М.,* ***Семисалов Б.В.*** Стационарное течение несжимаемой вязкоупругой полимерной жидкости в канале с эллиптическим сечением // Сиб. журн. индустр. мат. 2014. Т. 17, № 4(60). С. 38–47. (Перечень ВАК, Scopus)

Работы [2, 3, 7, 8, 14, 16, 18] написаны без соавторов. В статьях [2, 3] получены точные стационарные решения уравнений, описывающих пуазейлевские течения полимерной жидкости в цилиндрическом канале, проведён численный анализ нестационарных течений, получены условия потери устойчивости течений. Работы [7, 8, 14, 16, 18] посвящены разработке, обоснованию, реализации и тестированию нелокального метода без насыщения, а также построению оценок погрешностей численных решений.

В статьях с соавторами [1, 4, 5, 9, 11] соискателем развиты алгоритмы решения 4х-волнового кинетического уравнения, рассчитаны стационарные и автомодельные решения уравнения, описывающего кинетику волн бозе-газа, проведён сравнительный анализ спектров волнового действия и волновых статистик, полученных при решении уравнения Гросса–Питаевского и кинетического уравнения. Дополнительно в [4, 5, 11] при непосредственном участии соискателя даны постановки задач о поиске стационарных и автомодельных решений кинетического уравнения и найдены точные стационарные решения. Соавторами соискателя по работам [1, 4, 5, 9, 11] даны постановки задач, отвечающие положениям теории волновой турбулентности, разработаны и реализованы в виде комплекса программ методы решения уравнения Гросса–Питаевского, получены численные решения этого уравнения и проведён их анализ.

В работах [6, 10, 12, 13, 15] соискателем получены разрешающие уравнения, описывающие пуазейлевские течения несжимаемой вязкоупругой полимерной жидкости и разработан нелокальный метод без насыщения для решения этих уравнений. Дополнительно в [6, 12] соискателем проведены идентификация параметров модели и

анализ множественности стационарных решений; в [10] – сравнение полученных численных решений с результатами работы других методов; в [13] – апостериорный анализ погрешностей полученных решений. При моделировании течений полимерной жидкости в работах [17, 19] соискателем создан и реализован численный метод и проведены расчёты. Соавторами соискателя в работе [6] даны постановки задач о поиске установившихся течений, в работе [10] разработаны и применены метод конечных элементов и метод коллокаций и наименьших квадратов, в [12, 13, 15] проведён анализ полученных численных результатов, в [17, 19] выведены исходные уравнения и даны постановки задач о течении пуазейлевского типа.

На диссертацию поступили: отзыв ведущей организации, отзывы оппонентов, а также поступили 6 отзывов на автореферат. Все отзывы положительные. Отзывы содержат следующие замечания:

В отзыве ведущей организации ИГиЛ СО РАН:

1. Во введении диссертации сказано, что модель Покровского–Виноградова учитывает микроструктуру полимера при моделировании течений высококонцентрированных растворов и расплавов полимеров на макроуровне. Следовало указать, какие именно эффекты и в каких течениях воспроизводит модель. В тексте также отсутствует информация о других известных моделях, позволяющих учесть микроструктуру при описании макроскопических течений. Следовало дать комментарии об аналогиях используемых реологических соотношений с уравнениями этих моделей, а также о преимуществах модели Покровского–Виноградова (если такие имеются) при описании определённых видов течения.
2. Реологические соотношения модели Покровского–Виноградова содержат квадратичные нелинейности. В случае, если жидкость находится в состоянии покоя, могут ли у этих уравнений быть ненулевые решения? Имеют ли эти решения физический смысл?
3. В параграфе 2.1.1 «Алгоритм решения краевых задач для уравнений эллиптического типа» применяется метод установления. Этот метод использует дополнительную фиктивную переменную t и нестационарный оператор – регуляризацию B_t – для организации итерационного процесса. В чем коренное отличие предлагаемого метода от методов, рассмотренных в монографиях А.А. Самарского, А.В. Гулина? Проводилось ли сравнение с этими методами? Насколько важно знание собственных значений, и есть ли какие-либо рекомендации для случаев, когда собственные значения эллиптического оператора неизвестны?
4. В параграфе 4.3.1 обсуждаются стационарные решения кинетического уравнения, представляющие спектры Релея–Джинса (4.43). При этом сказано, что на этих решениях интегралы плотности частиц и энергии расходятся, поэтому нужно ограничивать диапазон волновых чисел некоторым числом $k_{\max}$. Значит ли это, что кинетика волн в рассмотренных приложениях всегда должна рассматриваться в ограниченном частотном диапазоне? Каким образом можно определить значение $k_{\max}$? Есть ли объяснение ограниченности частотного диапазона с точки зрения физики?

В отзыве официального оппонента Булатова М. В.:

1. Модификации полиномиальных и дробно-рациональных интерполяций, предложенные в работе, состоят во введении дополнительных множителей и слагаемых, позволяющих при решении краевых задач методом коллокаций реализовать нужный тип граничных условий. Могут ли предложенные модификации замедлить сходимость или негативно повлиять на устойчивость исходных использованных приближений и разработанных методов?

2. В диссертации использованы адаптации барицентрического приближения при изменении положения узлов. Можно ли адаптировать это приближение, изменяя значения весов? Каким образом?
3. В тексте Замечания 1.7 на стр. 77 при рассмотрении «чистой» задачи Неймана следует сформулировать дополнительные условия, обеспечивающие её корректность.
4. Можно ли использовать другие системы ортогональных функций в рамках разработанного алгоритма (в частности, полиномы Чебышёва второго рода)?

В отзыве официального оппонента Дьяченко А. И.:

1. Проводилось ли сопоставление метода решения начально-краевых задач, предложенного в диссертации, с псевдоспектральным методом, основанным на прямом и обратном преобразовании Фурье? Такой метод широко используется для численного анализа систем уравнений Эйлера, Навье–Стокса и многих других.
2. В пункте 2.1.3 диссертации описан способ локализации одной особой точки решения нелинейной начально-краевой задачи на отрезке. Можно ли обобщить алгоритм на случай, если особых точек несколько, или если они концентрируются в окрестности некоторой точки в комплексной плоскости?
3. При обсуждении результатов, касающихся сравнения спектров уравнения Гросса–Питаевского и соответствующего кинетического уравнения, несколько раз упоминаются условия о слабой нелинейности и «о достаточно (но не слишком) слабом взаимодействии волн» (стр. 255, 256, 267, 272, 303). Каким образом можно проверить эти условия для рассмотренных задач? В работе следовало провести исследование выполнимости этих условий.
4. О шести-восьми декадах. С одной стороны, шесть-восемь декад в инерционном интервале в решениях кинетических уравнений, как правило, недостижимы в лабораторных экспериментах и наблюдениях. А с другой стороны, эти декады являются важными для теоретического анализа.
5. При обсуждении неклассического степенно́го спектра в главе 4 имеется определённая путаница. На стр. 264 указано, что показатель степени этого спектра равен «–1.24», на рис. 4.13, а указано значение «–0.52», в пункте 4.4.4 приведены два значения: «–1.239» и «–1.218». Каковы всё-таки значения показателя неклассического спектра?

В отзыве официального оппонента Пышнограя Г. В.:

1. Критерий потери устойчивости пуазейлевского течения полимерной жидкости получен для значений феноменологических параметров $k = \beta$. Можно ли получить аналогичный критерий в случае $k > \beta$?
2. В параграфе 2.7 решены тестовые краевые задачи в двумерных и трёхмерных областях, представляющих канал экструдера. При этом в задачах, рассмотренных в главе 3, сечение каналов остается постоянным. Заметим, что реальные экструдеры представляют собой каналы с изменением геометрии. Это каналы с поворотами и с внезапными сужениями и расширениями. Известно, что многие важные особенности течения, возникающие в ходе экструзии, наблюдаются именно в окрестности сужения. Поскольку в диссертации говорится об актуальности работы для технологий экструзии, следовало провести расчёт течения в окрестности сужения канала. Можно ли применить разработанный метод для решения такой задачи?
3. Следует заметить, что результаты получены в диссертации с применением реологической модели, разработанной в 1994 году. При этом можно учесть поправки и многомодовые варианты реологических соотношений [Лаас, Макарова, Малыгина и соавт. Выч. мех. сплошных сред. 2021], позволяющие отразить некоторые эффекты, наблюдаемые при больших скоростях деформации, в частности, немонотонную зависимость элонгационной вязкости от скорости растяжения.

4. В таблице 36 приведены численные значения параметров задачи. Так как их количество достаточно велико, то имело бы смысл провести анализ их влияния на полученные результаты, что позволило бы выявить ключевые параметры задачи.

В отзыве на автореферат, подготовленном доктором физ.-мат. наук, зав. кафедрой теоретической и экспериментальной физики ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет» **Ветчаниным Евгением Владимировичем** имеются замечания редакционного характера:

1. Присутствуют опечатки.
2. В тексте автореферата часто используются аббревиатуры, поиск расшифровки которых является затруднительным. Для читателя было бы удобнее вынести все аббревиатуры в отдельный раздел.

Также имеется вопрос дискуссионного характера:

Причины применения соискателем дробно-рациональных аппроксимаций вполне понятны. Они могут обеспечить адекватные асимптотики, а также позволяют обнаруживать момент бифуркации, когда в решении возникают особые точки. Кроме того, согласно исследованиям соискателя, численные методы решения ОДУ на основе дробно-рациональных приближений превосходят классические методы, например, метод Рунге-Кутты. В частности, в автореферате утверждается, что для численного решения кинетического уравнения (12) метод Рунге-Кутты оказался непригодным. Не ясно, о каком именно методе идет речь. Могу лишь предположить, что подразумевается классический метод Рунге-Кутты 4 порядка, а проблемы численного решения связаны с жесткостью задачи. Возникает вопрос, почему рассматривался именно этот метод? Я полагаю, что уравнение (12) можно успешно решить методами Дормана–Принса с автоматическим выбором шага интегрирования по времени, либо с помощью методов Розенброка, методов Гаусса–Лежандра или разрывного метода Галеркина.

В отзыве на автореферат, подготовленном доктором физ.-мат. наук, профессором РАН, главным научным сотрудником отделения 2 Прикладных проблем математической физики и теории поля ФГБУН «Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук» **Казаковым Александром Леонидовичем:**

1. Судя по автореферату, комплексу программ, разработанному автором диссертации, посвящён всего один параграф, занимающий 3 страницы текста, что отчасти противоречит требованию Паспорта специальности 1.2.2 о том, что “Диссертационное исследование должно содержать все три составляющих названия специальности”. Впрочем, возможно, что это погрешность автореферата.

В отзыве на автореферат, подготовленном доктором физ.-мат. наук, академиком РАН, главным научным сотрудником лаборатории математической физики ФГБУН «Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук» **Кузнецовым Евгением Александровичем:**

Наиболее значимыми результатами диссертации являются: … 4. Численно и аналитически впервые обнаружена неустойчивость течения Пуазейля полимерной жидкости. Отметим, что для ньютоновских жидкостей такое течение линейно устойчиво. Последний результат является весьма важным с точки зрения различных приложений. Вместе с тем в первой части диссертации, посвященной этому вопросу, есть одно упущение: не обсуждается эффект растяжения макромолекулярных клубков полимеров потоком жидкости, который существенен при достаточно больших градиентах скорости потока.

В отзыве на автореферат, подготовленном кандидатом физ.-мат. наук, доцентом, доцентом кафедры фундаментальной и прикладной математики учреждения образования «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы» (Республика Беларусь) **Поцейко Павлом Геннадьевичем:**

1. Стр. 7, 2-е положение, выносимое на защиту. Написано: «Доказана теорема об устойчивости метода при решении уравнения Пуассона». Следует уточнить, о какой именно задаче для уравнения Пуассона идёт речь. Кроме этого, для классических начально-краевых задач для уравнения Пуассона вопрос об устойчивости метода решён ещё в работах А. А. Самарского. Об этом стоило бы сказать.
2. В рекомендациях по составлению формулировок в разделах диссертационных работ «Общая характеристика» и «Заключение» Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь написано «Желательно, чтобы количество “Положений” и их суть соответствовали количеству и сути поставленных задач». В автореферате указаны 4 цели работы и 7 положений, выносимых на защиту.
3. Стр. 6, последний абзац. Написано: «Для приближения функций, их производных и интегралов, а также для вывода оценок погрешности в работе использованы… ряды Фурье и Фурье–Чебышёва; интерполяционные полиномы с узлами Чебышёва…», затем далее на стр. 13, 1 строка сверху, написано «… проведён анализ эффективности подходов на основе рядов Фурье и интерполяционных многочленов с узлами Чебышёва». Возникает вопрос, использовались ли в работе именно ряды Фурье–Чебышёва и для решения каких из поставленных задач?
4. На стр. 14 указана формула (5), в которой отражён один из методов дробно-рациональных приближений функции $u(x)$. Он представляет собой некоторую дробно-рациональную функцию. Интересно было бы узнать аппроксимационные свойства этого метода.

В отзыве на автореферат, подготовленном доктором физ.-мат. наук, профессором кафедры дифференциальных уравнений ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» **Розановой Ольгой Сергеевной:**

В качестве недочётов оформления можно отметить наличие небольшого числа опечаток и слишком мелкий шрифт обозначений на некоторых рисунках, например, на рисунках 3, 10 и 11.

В отзыве на автореферат, подготовленном доктором физ.-мат. наук, профессором, академиком РАН, ректором ФГАОУ ВО «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» **Федоруком Михаилом Петровичем:**

1. Очевидно, задача расчёта автомодельных решений второго рода для кинетических уравнений, рассмотренная в параграфе 4.4, является сложной вычислительной проблемой. Были ли использованы какие-либо специальные методы для улучшения свойств сходимости разработанного итерационного процесса?
2. В параграфе 4.2 диссертации при выводе точного решения кинетического уравнения с логарифмической поправкой отмечено, что значения интеграла столкновения на решении $n_\omega \sim \omega^{-3/2}$ определяется неоднозначно. В результате в работе выведены два выражения для постоянного множителя $\tilde{C}_{\text{д}}$. Почему в автореферате указано лишь одно из них (см. формулу (24))?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их известностью и высоким уровнем компетентности по всем основным вопросам, рассмотренным в диссертации. В ведущей организации ИГиЛ СО РАН на протяжении многих лет под руководством г. н. с. Пухначёва В.В. ведутся разработка и анализ моделей динамики полимерной жидкости; исследования волновых взаимодействий и турбулентных каскадов в океанах и экспериментальных установках (работы директора

Ерманюка Е.В. и соавт.); проводится разработка методов численного анализа сингулярно возмущённых задач гидродинамики (работы в. н. с. Мошкина Н.П. и соавт.). Официальный оппонент Булатов М.В. имеет большой опыт в области разработки численных методов и алгоритмов решения вырожденных задач и задач с особенностями для нелинейных интегральных, интегро-дифференциальных и дифференциально-алгебраических уравнений и их систем. Официальный оппонент Дьяченко А.И. является признанным специалистом в области теории волновой турбулентности и численного анализа волновых взаимодействий в нелинейных гамильтоновых системах. В работах Дьяченко А.И. в соавторстве с акад. Захаровым В.Е. впервые предложены модели волновой кинетики в системах, описываемых нелинейным уравнением Шрёдингера. Официальный оппонент Пышнограй Г.В. возглавляет группу исследователей, активно занимающихся развитием класса мезоскопических моделей динамики растворов и расплавов полимеров. В соавторстве с создателем мезоскопического подхода, доктором физ.-мат. наук Покровским В.Н., им получены реологические соотношения, использованные в диссертации.

Высокий уровень компетентности официальных оппонентов и сотрудников ведущей организации в вопросах, рассмотренных в диссертации, подтверждается списками их публикаций (перечни публикаций приведены в дополнительных сведениях о диссертации, размещённых на сайте диссертационного совета).

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Разработан метод решения краевых и начально-краевых задач для нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка и задач Коши для кинетических уравнений, основанный на применении полиномиальных и дробно-рациональных интерполяций, метода коллокаций, метода установления и оригинального способа дискретизации исходных задач при сведении их к матричным и тензорным уравнениям Сильвестра. **Получены** апостериорные оценки погрешности разработанного метода.

Предложены обобщения реологической мезоскопической модели, позволяющие учесть влияние температурных и магнитных полей и эффектов диссипации на течения растворов и расплавов полимерных материалов в каналах, возникающие в технологиях экструзии и печати. **Описано** влияние параметров реологии и анизотропии течения, а также параметров внешних воздействий на жидкость и геометрии канала на свойства течения. **Рассчитаны** значения параметров, характеризующие установление и потерю устойчивости течений пуазейлевского типа.

Получены точные решения уравнений мезоскопической модели, описывающие стационарные осесимметричные течения типа Пуазейля полимерной жидкости. **Сформулированы** условия потери устойчивости таких течений. Показано соответствие этих условий экспериментальным данным.

Проведена верификация теории волновой турбулентности на примере физических систем, описываемых нелинейным уравнением Шрёдингера: показано, что спектры волнового действия динамической и кинетической моделей совпадают с высокой точностью на промежутке времени, равном удвоенному характерному времени эволюции волнового спектра, и наблюдается их качественное соответствие вплоть до разрушения решения кинетического уравнения.

Найдены точные стационарные решения кинетического уравнения, описывающие прямой каскад энергии и обратный каскад частиц бозе-газа. На основе этих решений дано объяснение отклонений экспериментальных данных от результатов теории локальной турбулентности в задаче о прямом каскаде энергии.

Для кинетического уравнения **с контролем погрешности рассчитаны** автомодельные решения второго рода, описывающие начало процесса конденсации Бозе–Эйнштейна.

Созданы и зарегистрированы 3 комплекса программ для ЭВМ: 1) «Программа поиска решений краевых задач для уравнений в частных производных с высокой точностью и малыми вычислительными затратами “Нелокальный метод без насыщения”» (свидетельство о гос. регистрации № 2015615527 от 20 мая 2015 г.), 2) «Программа для расчёта неизотермического течения вязкоупругой полимерной жидкости между двумя соосными цилиндрами с контролем погрешности» (свидетельство о гос. регистрации № 2018664836 от 22 ноября 2018 г.), 3) «Программа для решения четырёхволновых кинетических уравнений, описывающих однородное изотропное взаимодействие волн в нелинейных физических системах “4WaveKESolver”» (свидетельство о гос. регистрации № 2023687768 от 18 декабря 2023 г.). С применением указанных программ проведено численное моделирование исследуемых процессов, осуществлена верификация полученных аналитических и численных решений, показаны высокая точность и скорость сходимости разработанных методов и алгоритмов.

Теоретическая значимость исследования состоит в следующем:

показано, что применение разработанных полиномиальных и дробно-рациональных барицентрических интерполяций и нелокального метода без насыщения для решения нелинейных краевых и начально-краевых задач является эффективным с точки зрения соотношения «точность / затраты памяти и машинного времени»;

создана математическая модель, описывающая комплексное механическое, температурное и магнитное воздействие на течения концентрированных растворов и расплавов полимеров со сложной реологией;

предложен новый способ математического описания процесса потери устойчивости пуазейлевских течений полимерной жидкости;

проведена верификация теории волновой турбулентности на примере физических систем, описываемых нелинейным уравнением Шрёдингера;

найдены новые стационарные и автомодельные решения кинетического уравнения, описывающего однородные изотропные взаимодействия волн в бозе-газе.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что

1. Разработанные численные методы и комплексы программ применимы для решения широкого спектра задач: а) расчёт течений полимерной жидкости в каналах с достаточно сложной геометрией, возникающих в технологиях печати и экструзии; б) моделирование 4х-волновых взаимодействий в различных физических приложениях: оптика, космология, физика сверхтекучих жидкостей, течения на поверхности глубокой воды и другие; а также в) численный анализ нелинейных задач, возникающих в других приложениях, решения которых имеют большие градиенты и особые точки.
2. Условие потери устойчивости осесимметричного течения полимерной жидкости является важным для прогнозирования перехода к сложной и турбулентной динамике в каналах принтеров и экструдеров. Для реализации контролируемого бездефектного производства в технологиях печати и экструзии требуется исключать возможность такого перехода.
3. Стационарные и автомодельные решения кинетического уравнения, полученные в диссертации, являются важными для интерпретации экспериментальных данных о волновой кинетике бозе-газа (с их применением дано объяснение отклонений результатов экспериментов и теории локальной турбулентности) и для организации новых экспериментов по исследованию каскадных процессов в бозе-газах.

Оценка достоверности результатов исследования выявила следующее:

Полученные численные результаты являются достоверными, что подтверждено апостериорными оценками погрешности и высокой точностью, и скоростью сходимости, достигнутыми при численном анализе тестовых задач с известными точными решениями.

Результаты расчётов течения полимерной жидкости верифицированы в диссертации путем сравнения их с решениями, полученными другими методами (конечных элементов, коллокаций и наименьших квадратов), продемонстрировано соответствие решений с точностью до 3-х – 5-ти знаков при вариации основных параметров модели в широких диапазонах.

Стационарные и автомодельные решения кинетического уравнения, полученные в диссертации, верифицированы путём сравнения со спектрами волнового действия, рассчитанными при решении уравнения Гросса–Питаевского, описывающего динамику волн.

Условия потери устойчивости осесимметричного течения полимерной жидкости и найденные решения кинетического уравнения соответствуют экспериментальным данным.

Личный вклад соискателя.

Соискателем разработаны и реализованы методы приближения и алгоритмы поиска решений краевых и начально-краевых задач для нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, получены оценки погрешности;

- получены системы уравнений, описывающие пуазейлевские течения несжимаемой вязкоупругой полимерной жидкости при наличии механических, температурных и магнитных воздействий на жидкость, идентифицированы их параметры и найдены численные решения;
- найдены точные стационарные решения задачи об осесимметричном пуазейлевском течении полимерной жидкости в цилиндрическом канале и получены условия потери устойчивости таких течений;
- проведена верификация численных решений задачи о течении полимерной жидкости при сравнении с результатами, полученными методом конечных элементов и методом коллокаций и наименьших квадратов;
- разработана вычислительная модель однородного изотропного взаимодействия волн в физических системах, описываемых нелинейным уравнением Шрёдингера;
- проведён расчёт стационарных и автомодельных режимов волновой кинетики, описывающих прямой каскад энергии и обратный каскад частиц бозе-газа;
- на больших интервалах по времени дан сравнительный анализ спектров моделей, описывающих динамику и кинетику волн в бозе-газах.

В ходе защиты диссертации вопросы соискателю задали: председатель диссертационного совета, академик РАН д.ф.-м.н. Б.Н. Четверушкин, члены диссертационного совета: чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. Петров И.Б., чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. В.Ф. Тишкин, чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. Ю.В. Василевский, д.ф.-м.н. И.С. Меньшов, д.ф.-м.н. Н.В. Змитренко, д.ф.-м.н. С.В. Поляков, д.ф.-м.н. В.А. Гаранжа.

В частности, Петров И.Б. попросил уточнить нишу предложенных соискателем численных методов в современной вычислительной математике, охарактеризовать их свойства и качества, важные для решения прикладных задач. Соискатель дал подробные пояснения. Четвершушкин Б.Н. спросил, можно ли обобщить предложенные методы для решения более сложных задач, возникающих в технологиях производства изделий из полимеров, и для изученных более простых постановок о течениях пуазейлевского типа попросил указать важность рассмотренных эффектов и новизну полученных результатов. Соискатель ответил, что разработанный метод допускает обобщения для решения задач в

областях довольно сложных форм и учитывает особенности искомых решений, по поводу более простых постановок – подчеркнул высокую важность критериев потери устойчивости течений пуазейлевского типа и новизну подходов к анализу этого эффекта, предложенных в диссертации. Меньшов И.С. спросил о возможности применения созданных подходов для анализа ламинарно-турбулентного перехода в течениях классической жидкости либо газа в пограничном слое и в трубе, а также подчеркнул, что во многих задачах условие существования решений и потеря устойчивости являются разными эффектами. Соискатель пояснил, что указанные задачи о ламинарно-турбулентных переходах в рамках диссертации не рассматривались, однако, по мнению соискателя, предложенные численные методы годятся для анализа этих задач. Проблему получения условий потери устойчивости (разрушения) течений пуазейлевского типа неньютоновской полимерной жидкости, как показано в диссертации, можно решать, используя условия существования действительных ветвей соответствующих решений. Змитренко Н.В. поинтересовался, какой физический объект соответствует бозе-газу, а также спросил, какие размеры сеток использовались в алгоритмах и на каких ЭВМ проводились расчёты. Соискатель ответил, что в экспериментах, с которыми сопоставлялись результаты моделирования, рассматривался бозе-газ, состоящий из фотонов; при ответе на второй вопрос подчеркнул важность учёта особенностей искомых решений при разработке методов их приближения, поскольку такой учёт позволяет проводить высокоточные расчёты на сетках небольшого размера: порядка нескольких десятков либо сотни узлов коллокации по каждому направлению. Поляков С.В. спросил, о каких масштабах идёт речь при моделировании течений полимерной жидкости, попросил пояснить термин «мезоскопическая модель» и привести пример полимерной жидкости, течение которой моделируется в диссертации, а также задал вопрос о необходимости учёта влияния электрического и магнитного полей и сделал замечание о том, что в нестационарном случае в обобщённой мезоскопической модели для вектора напряжённости магнитного поля H нужно оставить только уравнение «div H = 0». Соискатель согласился с замечанием, пояснив, что влияние магнитного поля исследовалось только в стационарной задаче, подчеркнул, что исследуются макроскопические течения и дал пояснения об использованном термине, сообщил, что примером полимерной жидкости является раствор полиэтилена, а влияние электрического поля в предложенной модели не учитывалось. Василевский Ю.В. попросил уточнить фразу из 2-го положения, выносимого на защиту, об обобщении метода для решения задач в областях сложной геометрии: речь идёт только о примитивных (канонических) областях и использовании замен переменных, приводящих к таким областям, или есть возможность рассматривать более сложные области? Соискатель пояснил, что в параграфе 2.7 диссертации на основе метода итераций по подобластям разработаны обобщения нелокального метода без насыщения, конкретно, метод спектральных элементов. Применение этого метода в совокупности с возможностью использования замен переменных в каждой подобласти позволяет решать задачи в областях сложной геометрии. При этом соискатель согласился с тем, что множество областей, в которых предложенный метод будет работать, ограничено. Тишкин В.Ф. поинтересовался, как можно использовать дробно-рациональные функции для приближения решений с точками ветвления. Соискатель пояснил, что известны результаты о сгущении полюсов дробно-рациональных приближений в окрестности точки ветвления приближаемой функции, это даёт возможность приближённо определить положение точки ветвления, анализируя положения полюсов, и повысить скорость сходимости. Гаранжа В.А. задал вопросы о возможности использования результатов диссертации для построения метода спектральных элементов на вытянутых 4х-угольных ячейках или параллелепипедах, о происхождении термина «барицентрическая интерполяционная формула» и о том, как были обработаны особенности коэффициентов барицентрической формулы. Соискатель объяснил, что на указанных вытянутых ячейках и при наличии у них острых углов

В частности, член совета Меньшов И.С. спрашивал соискателя, почему в математической модели двухфазная среда является односкоростной и многотемпературной, хотя времена скоростной и тепловой релаксации одинаково малы. Соискатель ответила, что времена скоростной и тепловой релаксации действительно малы. Однако, априорный переход к однотемпературной модели для газа и частиц не обоснован, поскольку разность между температурами газа и частиц зависит от интенсивности поглощенного частицами лазерного излучения и от эндотермических химических реакций. Председатель совета Четверушкин Б.Н. поинтересовался, учитывается ли в математической модели излучение самими наночастицами. Соискатель ответила, что учитывается в уравнении энтальпии и уравнении для температуры наночастиц. Член совета Колесниченко А.В. спросил соискателя, как рассчитываются многокомпонентные коэффициенты диффузии. Соискатель ответила, что средний по смеси коэффициент диффузии рассчитывается по формуле Уилки через бинарные коэффициенты диффузии. Член совета Змитренко Н.В. поинтересовался, какие целевые продукты соискатель получает при конверсии метана. Соискатель ответила, что преимущественно образуются этилен, водород и ароматические соединения. Член совета Василевский Ю.В. задал вопрос, рассчитывалась ли экономическая эффективность предлагаемой технологии переработки метана. Соискатель сообщила, что прибыль не рассчитывалась, однако практическая значимость диссертации связана с проверкой в ходе вычислительных экспериментов возможности осуществления лазерной конверсии метана на лабораторном уровне.

Существенных замечаний по диссертации высказано не было. Соискатель ответила на заданные ей в ходе заседания вопросы, согласилась с рядом замечаний, указанных в письменных отзывах, и дала комментарии в необходимых случаях.

В дискуссии приняли участие: председатель совета д.ф.-м.н. Четверушкин Б.Н., член совета д.ф.-м.н. Луцкий А.Е. и к.ф.-м.н. Снытников В.Н., ведущий научный сотрудник Института катализа СО РАН.

На заседании 6 марта 2025 года диссертационный совет принял решение: за комплекс результатов, дающих решение крупной научно-технической проблемы разработки численных моделей для задач лазерной термохимии газа в присутствии каталитических наночастиц и исследование на их основе процессов лазерной конверсии метана, что имеет большое значение для народного хозяйства в части разработки новых ресурсосберегающих технологий получения водорода и ценных углеводородов, присудить Песковой Елизавете Евгеньевне ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 19, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета 24.1.237.01 Б. Н. Четверушкин

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.237.01 М. А. Корнилина

6 марта 2025 года.