



УТВЕРЖДАЮ:

Директор Института гидродинамики  
и механики им. М.А. Лаврентьева СО РАН  
Доктор физико-математических наук

Е.В. Ерманюк  
13.03.2025г.

Отзыв ведущей организации о научно-практической ценности диссертации  
**Семисалова Бориса Владимировича** «Моделирование течений  
вязкоупругих полимерных сред и слаботурбулентных процессов в бозе-газах  
на основе дробно-рациональных приближений и алгоритмов без  
насыщения», представленной на соискание учёной степени доктора физико-  
математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое  
моделирование, численные методы и комплексы программ

#### **Актуальность избранной темы**

Разработка методов предсказательного математического моделирования для анализа сингулярно-возмущённых задач гидродинамики представляет актуальную проблему высокой сложности. Проблема состоит в отсутствии общих подходов, позволяющих с необходимой степенью достоверности и точности предсказывать динамику жидкостей и газов в случае, когда у решений соответствующих уравнений возникают большие градиенты, фронты и другие особенности, которые с течением времени или при вариации параметров могут приводить к качественному изменению характера течения. Математически этот эффект зачастую можно связать с возникновением точек ветвления и других особых точек решений и с тем, что классическое (достаточно гладкое) решение задачи перестаёт существовать. Проблема является комплексной и касается, с одной стороны, теории локального и глобального существования решений нелинейных уравнений с частными производными, с другой стороны, она имеет непосредственное отношение к нерешённым задачам гидродинамики (описание на нелинейном уровне потери устойчивости течений вязкой и вязкоупругой жидкостей и газов, эффектов «blow-up», коллапсов, бифуркаций и хаоса), с третьей, – имеется связь с актуальными прикладными задачами.

#### **Цель работы**

Целью диссертационного исследования Семисалова Бориса Владимировича является разработка математических и численных методов 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. Аккуратный учёт особенностей, возникающих у решений рассмотренных задач, позволил получить ряд новых результатов.

### **Значимость результатов диссертации для прикладной гидродинамики и приоритетных направлений научно-технологического развития РФ**

Адекватное описание эффектов, возникающих в течениях достаточно концентрированных растворов и расплавов полимерных материалов имеет большое значение для развития технологий печати и экструзии, что соответствует пункту а) положения 21 Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (утверждена Указом Президента РФ № 145 от 28 февраля 2024 г.) В диссертации использованы реологические соотношения мезоскопической модели Покровского–Виноградова, учитывающие микроструктуру полимера и наведённую анизотропию, даны постановки задач о течениях пуазейлевского типа в каналах при воздействии температурного и магнитного полей, разработаны эффективные алгоритмы решения поставленных задач. Наиболее значимые результаты этой части работы 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. Рекомендуются внедрение указанных результатов на предприятиях, занимающихся созданием новых материалов на полимерной основе и производственных технологий с применением таких материалов.

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 больших 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. Полученные результаты следует использовать для постановки новых видов экспериментов и корректного анализа собранных данных при исследовании свойств бозе-газа, нелинейных оптических систем, сверхтекучести, космологических моделей Вселенной.

## **Содержание работы и его оценка**

Диссертационная работа Семисалова Бориса Владимировича представляет фундаментальный научный труд и включает введение, четыре главы, заключение, список литературы и четыре приложения. Диссертация содержит 364 страницы, 84 рисунка, 36 таблиц. Библиография включает 321 наименование.

Во введении содержатся: литературный обзор; описание проблем, на решение которых направлена работа, и их актуальности; формулировки принципов и методов, заложенных соискателем в основу работы; краткое изложение целей и задач работы, положений, выносимых на защиту, новизны, значимости, обоснованности и достоверности результатов.

Глава 1 посвящена разработке методов приближения функций, их производных и интегралов на основе рядов Фурье и Фурье–Чебышёва, а также барицентрической формы записи интерполяционного полинома.

В главе 2 создан нелокальный метод без насыщения для решения нелинейных краевых и начально-краевых задач для дифференциальных уравнений, а также задач Коши для кинетических уравнений.

Глава 3 посвящена исследованию задач о пуазейлевском течении несжимаемой вязкоупругой полимерной жидкости и описанию процессов установления и потери устойчивости такого течения.

В главе 4 проведено моделирование волновых взаимодействий в физических системах, описываемых уравнением Шрёдингера с кубической нелинейностью.

В заключении соискатель подвёл итоги работы и сформулировал направления дальнейшего развития полученных результатов.

В четырёх приложениях содержатся соответственно: 1) формулировки теоретических результатов, использованных в работе; 2) доказательства теорем и лемм, сформулированных в диссертации; 3) формулы для элементов матриц, аппроксимирующих производные, и анализ спектральных разложений и обусловленностей матриц; 4) перечень параметров модели течения с их значениями.

Текст работы написан грамотно. Основные результаты диссертации изложены последовательно и понятно. Все результаты, использованные соискателем, сопровождаются ссылками на литературу. При описании алгоритмов и результатов моделирования соискатель привёл значительное количество графиков и таблиц, демонстрирующих высокую точность, обоснованность и достоверность результатов. Отметим, что работа несколько перегружена техническими деталями, которые, вероятно, стоило опустить, дав ссылки на публикации соискателя. С другой стороны, текст содержит всю информацию (включая формулировки использованных теорем и оценок), необходимую для полного понимания и глубокого анализа содержания работы.

### **Новизна исследований и полученных результатов**

В диссертации предложены новые методы для численного моделирования гидродинамических процессов, позволившие учесть свойства и особенности рассмотренных задач: свойство высокой гладкости решений, характерное для уравнений эллиптического и параболического типов, и наличие особых точек у аналитических продолжений искомых решений в комплексную плоскость, связанное с существенной нелинейностью задач и природой рассмотренных явлений. Для учёта гладкости решений в диссертации предложены новые алгоритмы на основе приближений без насыщения, для учёта влияния особых точек – новые варианты дробно-рациональных барицентрических интерполяций и методы локализации особенностей на основе приближений Чебышёва–Паде.

Новизна полученных результатов в рамках моделирования течений полимерной жидкости включает следующие положения:

- Впервые с применением мезоскопического подхода получены разрешающие системы уравнений, описывающие неизотермические МГД течения пуазейлевского типа несжимаемой вязкоупругой полимерной жидкости. Даны соответствующие постановки задач и найдены их решения.
- Показано, что большое влияние на свойства полученных решений оказывает соотношение параметров, характеризующих размеры и ориентацию молекул полимера (они определяют изотропные и анизотропные вклады в силу трения, действующую на молекулы полимера при течении жидкости).
- Найдены точные решения задачи об установившемся осесимметричном течении полимерной жидкости в цилиндрическом канале. При анализе условий существования этих решений предложен новый способ описания процесса потери устойчивости течения.

Новизна результатов, полученных моделировании волновых взаимодействий в бозе-газе, состоит в следующем:



- Показано высокоточное совпадение спектров динамического уравнения Гросса–Питаевского и решений кинетического на больших отрезках по времени.
- Установлено, что характерное время эволюции статистических величин (функции плотности вероятности интенсивностей волн и кумулянтов) от детерминированных начальных условий к гауссовой статистике совпадает с характерным временем эволюции волнового спектра.
- Поучены уточнения стационарных решений, описывающих прямой каскад энергии и обратный каскад частиц бозе-газа.
- Для кинетического уравнения дана постановка задачи об автомодельном решении второго рода, описывающем начало процесса конденсации Бозе–Эйнштейна. Решения задачи найдены численно с контролем погрешности.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений** подтверждается оценками погрешности разработанных методов; значительным количеством численных экспериментов, демонстрирующих высокую точность и скорость работы созданных методов и алгоритмов; верификацией полученных решений при сравнении с результатами работы других методов; соответствием полученных решений экспериментальным данным.

Отметим также, что положения, выводы и заключения диссертации прошли всестороннюю апробацию на профильных научных семинарах и конференциях. **По теме диссертации опубликованы** 19 работ в рецензируемых научных изданиях из списка ВАК, либо в изданиях, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus; семь из них выполнены без соавторов. Среди них отметим хорошо известные и престижные журналы «Прикладная механика и техническая физика», «Журнал вычислительной математики и математической физики», «Математическое моделирование», «Physical Review E», «Physical Review Letters». Три комплекса программ, разработанные в диссертации, зарегистрированы в ФИПС.

**Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации**

#### **Вопросы и замечания по тексту диссертации**

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 других 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 временную переменную  $t$  и нестационарный оператор – регуляризацию  $Bt$  – 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 Рэлея-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 в 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?

Указанные замечания не снижают общего положительного впечатления о диссертационной работе Семисалова Б.В.

### **Заключение по диссертации.**

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 значения. Конкретными потребителями результатов диссертации могут быть академические и научно-образовательные учреждения, в частности, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Институт гидродинамики им М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирский государственный университет. Совокупность положений диссертационной работы можно квалифицировать как научное достижение в области математического моделирования. Представляется целесообразным издание диссертации в виде монографии.

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».

Отзыв на диссертационную работу обсуждён и одобрен на общеинститутском научном семинаре «Прикладная гидродинамика» 12 марта 2025 г., протокол № 6. Отзыв подготовили

Ведущий научный сотрудник лаборатории прикладной и вычислительной гидродинамики ИГиЛ СО РАН  
доктор физико-математических наук, доцент

 Н.П. Мoшкин,

адрес электронной почты: [nikolay.moshkin@gmail.com](mailto:nikolay.moshkin@gmail.com), тел.: +7 913 452-01-85

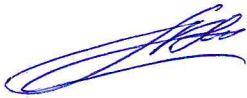
Главный научный сотрудник лаборатории прикладной и вычислительной гидродинамики ИГиЛ СО РАН  
доктор физико-математических наук,  
профессор, член-корреспондент РАН

 В.В. Пуxначев

адрес электронной почты: [pukhnachev@gmail.com](mailto:pukhnachev@gmail.com), тел.: +7 913 453-06-13.

Подписи Мошкина Н.П. и Пухначева В.В. заверяю:

учёный секретарь ИГиЛ СО РАН кандидат физико-математических наук



А.К. Хе

13.03.20



**Полное наименование организации:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук»

**Адрес:** 630090 Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д.15

**Телефон:** +7 (383) 333-16-12

**Сайт организации:** <http://www.hydro.nsc.ru>

**E-mail:** [igil@hydro.nsc.ru](mailto:igil@hydro.nsc.ru)