

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Семисалова Бориса Владимировича

на тему: «Моделирование течений вязкоупругих полимерных сред и слаботурбулентных процессов в бозе-газах на основе дробно-рациональных приближений и алгоритмов без насыщения»,

представленную на соискание степени доктора физико-математических наук по специальности: 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Диссертация посвящена разработке методов математического и численного моделирования для исследования задач из области гидродинамики, имеющих важные приложения. Первое приложение состоит в моделировании течений достаточно концентрированных растворов и расплавов линейных полимеров в каналах под действием перепада давления при наличии температурных и магнитных полей. В диссертации исследованы установление и потеря устойчивости таких течений, что, в частности, является важным для реализации процессов экструзии и печати с применением полимерных материалов. Второе приложение касается описания волновой кинетики бозе-газа, что имеет существенное значение для исследования турбулентных процессов в рамках некоторых разделов физики (в оптике, сверхтекучести, космологии). На основе методов, предложенных в диссертации, соискателю удалось найти решения нескольких открытых проблем из двух указанных приложений. Таким образом, **актуальность избранной темы и проведённых исследований для современной науки не вызывают сомнений.**

Методология работы состоит в разработке и применении нового подхода к построению численных алгоритмов, позволяющего учесть тонкие эффекты, связанные с гладкостью неизвестных функций и наличием особых точек у их аналитических продолжений. Подход основан на применении полиномиальных и дробно-рациональных приближений высокого порядка и оригинальной комбинации методов коллокации и установления, что позволило перейти от исходных нелинейных дифференциальных задач к системам линейных алгебраических уравнений. Отметим, что соискатель записывает эти системы в нестандартном виде – в виде матричных уравнений Сильвестра и их тензорных аналогов. Это позволяет значительно ускорить работу алгоритмов. Цель разработки такой методологии, как указано во введении, состоит в том, чтобы существенно снизить затраты памяти и число операций алгоритма для получения решений с заданной точностью. Судя по материалам диссертации, соискателю удалось достичь этой цели в двух изученных приложениях.

Соискатель уделил должное внимание обоснованию разработанных методов и результатов, полученных с их применением. Существенная часть работы посвящена построению оценок погрешности (см. теоремы в параграфах 1.2 и 1.4),

тестированию созданных методов (параграфы 2.2, 2.3, 2.5, 2.7), сравнению полученных результатов с результатами других методов (параграфы 2.6 и 3.3) и с точными решениями рассмотренных задач (параграфы 3.5 и 4.2), обсуждению результатов в контексте известных и общепризнанных теоретических и экспериментальных работ в двух рассмотренных приложениях (пункты 3.5.4, 4.1.6, 4.2.3, 4.3.2). В связи с этим **нужно отметить высокую степень обоснованности и достоверности** научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Среди наиболее важных результатов, имеющих научную новизну, можно отметить

1. Новый подход к построению быстрых численных алгоритмов, позволяющий учесть гладкость и особенности решений нелинейных краевых и начально-краевых задач для дифференциальных уравнений и контролировать погрешности.
2. Графики и таблицы, описывающие влияние реологических параметров, анизотропии, начальной вязкости, начального времени релаксации, коэффициента теплопроводности, геометрии и других параметров на характеристики течения полимерной жидкости в канале.
3. Точные стационарные решения уравнений мезоскопической модели, описывающие ламинарные осесимметричные течения в цилиндрическом канале.
4. Новые стационарные и автомодельные решения кинетического уравнения, описывающего однородные изотропные взаимодействия волн в бозе-газе.

Указанные результаты представляют существенную научную и практическую ценность. Остановимся немного подробнее на результатах, касающихся течений полимерной жидкости. В диссертации использованы реологические соотношения мезоскопической модели Виноградова–Покровского, конкретно, вариант этой модели, опубликованный впервые в 1994 г. [Пышнограй, Покровский, Яновский и соавт. Докл. АН СССР. 1994]. Важно отметить, что использованные соотношения позволяют учесть наведённую потоком анизотропию подвижности элементов макромолекулы, которая носит тензорный характер, что является принципиально важным для адекватного описания рассмотренных течений. В частности, хорошо известно, что учет анизотропии при течении высококонцентрированных растворов и расплавов полимеров качественным образом меняет структуру течений Пуазейля: профиль скорости становится существенно непараболическим. Отметим, что наведенная потоком анизотропия учитывается далеко не в каждой реологической модели: в хорошо известных моделях Максвелла, Oldroyd-B, FENE этого эффекта нет. В связи с этим считаю, что реологические соотношения, использованные в диссертации, соответствуют целям и задачам исследования, а полученные результаты адекватно описывают реализуемые на практике течения. Это характеризует их высокую ценность. Особенно важными в этом контексте являются критические соотношения значений параметров осесимметричных течений, которые характеризуют потерю их

устойчивости. Как видно из формул, выведенных в диссертации, потеря устойчивости связана со стремительным возрастанием градиентов скорости течения вблизи стенок каналов, что соответствует данным экспериментов.

Отмеченные обстоятельства позволяют **рекомендовать полученные результаты к использованию** для организации экспериментов по исследованию течений растворов и расплавов полимеров в каналах: их установления и потери устойчивости.

Оценка содержания работы и завершённости.

Диссертация Семисалова Б.В. представляет собой завершённый научный труд, в котором гармонично сочетаются три основных блока специальности 1.2.2:

- математические модели гидродинамических процессов;
- численные методы и алгоритмы решения уравнений моделей;
- реализация методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для ЭВМ.

Диссертация состоит из списка обозначений и сокращений, введения, четырех глав, заключения, списка литературы и четырех приложений.

Введение содержит описание проблем и методологии исследования, целей и задач работы; формулировку положений, выносимых на защиту; обоснование новизны, достоверности, теоретической и практической ценности полученных результатов.

Глава 1 посвящена разработке методов приближения, позволяющих учесть граничные и начальные условия задач для дифференциальных уравнений и адаптировать вычислительный процесс к имеющимся особенностям решений. В главе также описаны методы приближения дифференциальных и интегральных операторов, присутствующих в исследуемых моделях, получены оценки погрешностей.

Глава 2 содержит описание метода решения краевых и начально-краевых задач для нелинейных уравнений с частными производными, а также изложение метода решения задачи Коши для интегро-дифференциального кинетического уравнения. В главе проведено множество тестовых расчётов, результаты которых подтверждают высокую скорость сходимости и адаптивные качества методов. В модельной задаче о течении полимерной жидкости показаны преимущества разработанного метода над методом конечных элементов и методом коллокаций и наименьших квадратов по точности и по скорости работы. Разработаны и протестированы варианты метода для решения задач в областях с достаточно сложной геометрией, например, в области, представляющей канал с внезапным сужением.

Глава 3 посвящена моделированию течений пуазейлевского типа несжимаемой вязкоупругой полимерной жидкости. Здесь описана модель,

позволяющая учесть эффекты теплопроводности, диссипации тепла и воздействие магнитного поля (речь идёт о растворе полимера в проводящей жидкости). Даны постановки задач о течении в каналах с сечениями круглой, эллиптической и прямоугольной форм с внутренними включениями; исследована множественность решений стационарных задач; выявлены устойчивые ветви решений; проведено численное моделирование течений в широком диапазоне параметров; найдены точные стационарные решения осесимметричной задачи о течении в цилиндрическом канале; предложен способ описания потери устойчивости такого течения.

Глава 4 включает результаты моделирования волновых взаимодействий в физических системах, описываемых нелинейным уравнением Шрёдингера. Здесь при решении кинетического уравнения получены спектры волнового действия бозе-газа, показано соответствие спектров, рассчитанных при решении кинетического и динамического уравнений на больших отрезках по времени; получены и проверены в расчётах точные стационарные решения кинетического уравнения; найдены автомодельные решения первого и второго рода, описывающие прямой каскад энергии и обратный каскад частиц бозе-газа.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Список вопросов и замечаний по работе

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.

Вопросы и замечания, возникшие в ходе прочтения работы, не влияют на общее положительное впечатление о диссертации.

Заключение по диссертационной работе Семисалова Бориса Владимировича

Представленная диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решены научные проблемы, имеющие важное социально-экономическое значение. Имеется соответствие всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842. Содержание работы и положения, выносимые на защиту, соответствуют паспорту специальности 1.2.2 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Результаты работы прошли достаточную апробацию на научных семинарах и конференциях и были опубликованы в 19-ти научных статьях в журналах, рекомендованных ВАК, и журналах, индексируемых базами данных Web of Science или Scopus. Созданные алгоритмы реализованы в виде трёх комплексов программ для ЭВМ.

Учитывая всё изложенное, считаю, что представленная работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, а её автор Семисалов Борис Владимирович заслуживает присуждения ему искомой учёной степени.

Отзыв составил официальный оппонент

Пышнограй Григорий Владимирович
доктор физико-математических наук,
профессор по кафедре высшей математики,
ведущий научный сотрудник научного управления Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский
государственный технический университет им. И.И. Ползунова»,
656038, Алтайский край, г. Барнаул, проспект Ленина, д. 46,
+7 906 940 82 30, pyshnograi@mail.ru



Пышнограй Г.В.

12 марта 2025

Подпись в. н. с. научного управления Пышнограя Г. В. заверяю:

Начальник управления кадров и документооборота АлтГТУ Анашкин С.В.

