

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»



Нагоев З.В.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

ФГБНУ «Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук» на диссертационную работу

Бейбалаева Ветлугина Джабраиловича

«Математические модели динамических процессов во фрактальных и пористых средах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Диссертационная работа Бейбалаева Ветлугина Джабраиловича посвящена развитию новых методов моделирования динамических процессов во фрактальных и пористых средах с учетом эффектов памяти и пространственных корреляций, а также разработке эффективных алгоритмов численного решения начальных и краевых задач для дробных дифференциальных уравнений и реализация этих алгоритмов в виде комплексов объектно-ориентированных программ.

1. Актуальность темы исследования

Применение дробных операторов в дифференциальных уравнениях математических моделей тех или иных физических процессов связано, как правило, с описанием диссипативных и эрдитарных динамических процессов, обусловленных эффектом памяти. При построении математических моделей нелокальных динамических процессов для формализации эффектов памяти в физической системе применяются дробные производные по времени, а для описания течения процессов в объектах со сложной структурой и многофазным составом – производные дробного порядка по координате. Одним из научных направлений, получивших свое развитие, является исследование и практическое использование эффектов памяти в горных породах при решении задач геоконтроля и прогнозирования глубинных температур. Память представляет собой фундаментальное свойство горных пород накапливать, хранить и воспроизводить информацию об испытанных в прошлом воздействиях. Структура такого материала как горная порода, как и многих других природных материалов, обладает иерархией и определенным самоподобием в широком диапазоне масштабов. Таким образом, при исследовании нелокальных процессов теплопереноса в горных породах актуально применение математических методов, основанных на представлениях о фракталах и математическом аппарате интегралов и производных дробного порядка. Как известно, при поиске аналитических решений дифференциальных уравнений с дробными производными часто возникают большие трудности, поэтому наряду с аналитическими методами развиваются и численные методы решения начальных и краевых задач для дифференциальных уравнений дробного порядка. В связи с этим и ограниченностью программных средств численного исследования нелокальных динамических процессов, становится актуальной разработка эффективных алгоритмов и на их основе объектно-ориентированных комплексов программ для численного исследования динамических процессов во фрактальных и пористых средах. Поскольку диссертационная работа

направлена на решение вышеизложенных проблем, направление исследований Бейбалаева В. Д. является актуальным.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Представленные в диссертационной работе Бейбалаева В. Д. научные положения, выводы и рекомендации обладают высокой степенью обоснованности. В диссертационной работе автор ссылается на большое количество научных работ отечественных и зарубежных авторов в этой области. Результаты исследований автора не противоречат известным результатам, которые получены другими авторами. Достоверность работы подтверждается применением фундаментальных методов исследования динамических процессов, корректными постановками задач и математической обоснованностью полученных решений и обосновываются вычислительными экспериментами. Результаты численного моделирования теплопроводности горных пород в зависимости от температуры и давления подтверждаются их адекватностью и согласованностью с экспериментальными данными. Работа прошла апробацию на ведущих международных и всероссийских конференциях, ее результаты опубликованы в научных изданиях, входящих в международные реферативные базы Scopus, WOS и рекомендованных ВАК.

3. Научная новизна исследования и полученных результатов

Научная новизна диссертационной работы Бейбалаева Ветлугина Джабраиловича включает следующие пункты:

1. Разработаны разностные методы и алгоритмы нахождения приближенного решения задачи Коши для систем ОДУ и краевых задач для уравнения теплопроводности с дробными производными. Доказаны теоремы о сходимости этих разностных методов и получены условия для нахождения шага сетки в зависимости от параметра дробной производной.

2. Проведено качественное исследование поведения фазовых траекторий линейных и нелинейных динамических систем, описываемых

системой из двух дифференциальных уравнений с производной дробного порядка Капуто. Показано, что при переходе к дробной производной в фазовой плоскости происходят характерные топологические изменения.

Кроме того, проведено численное исследование фрактальных характеристик микроструктуры газоразрядных каналов и динамику электронов в них с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента на основе математического аппарата дифференциальных уравнений дробного порядка.

3. Проведено численное исследование нестационарных процессов промерзания и неизотермической фильтрации в средах с фрактальной структурой, включающие эффекты памяти и пространственные корреляции через производные дробного порядка Капуто по времени и Рисса по пространственной переменной. Получены аналитические решения начально-краевых задач для нестационарного уравнения теплопроводности с граничными условиями второго и третьего рода. Представлен анализ нелокальных процессов конвективного теплообмена с внешней средой с учетом эффектов памяти через дробную производную по времени. Проведено комплексное исследование процессов конвективного теплообмена с внешней средой для полуограниченного тела с учетом эффектов памяти.

4. На основе экспериментальных данных проведено численное моделирование теплопроводности горных пород в зависимости от температуры и давления с применением современных технологий математического моделирования и вычислительного эксперимента, основанных на корреляционно-регрессионном анализе.

5. В диссертационной работе разработаны комплексы объектно-ориентированных программ для численного исследования нелинейных динамических систем, описываемых дробными дифференциальными уравнениями, нелокальных процессов теплопроводности с учетом эффектов памяти и пространственных корреляций и теплопроводности горных пород в зависимости от температуры и давления.

4. Значимость результатов для науки

Значимость результатов диссертационной работы Бейбалаева В. Д., которые включают в себя численные методы решения начальных и краевых задач для дифференциальных уравнений с производными дробного порядка, теоремы об устойчивости и сходимости этих методов, вносят существенный вклад в развитие фундаментальных основ численных методов решения дифференциальных уравнений с производными дробного порядка. Представленные результаты качественного исследования линейных и нелинейных динамических систем, описываемых дифференциальными уравнениями дробного порядка, могут служить основой для анализа дробно-дифференциальных моделей динамических систем. Предложенная теория линеаризации нелинейных дифференциальных уравнений дробного порядка, позволяющая свести исходные задачи более простым, для которых возможно получить аналитические результаты, может служить необходимым промежуточным шагом для анализа нелинейных моделей динамических систем. Представленные результаты исследования нестационарных процессов теплопереноса и аналитические решения начально-краевых задач для нестационарного уравнения теплопроводности с граничными условиями второго и третьего рода, внесут вклад в развитие фундаментальных основ дифференциальных уравнений с производными дробного порядка.

5. Практическая значимость полученных автором диссертации результатов

Полученные автором результаты исследования нестационарных процессов неизотермической фильтрации, включающие эффекты памяти и пространственные корреляции через производные дробного порядка, могут быть использованы при моделировании и проектировании нефтяных месторождений, функционировании геотермальных систем и прогнозировании глубинных температур, а также для создания программных продуктов для их численного моделирования. При подготовке, бурении и эксплуатации скважин огромное значение имеет мониторинг и прогноз

температурного поля в призабойной зоне, что и накладывает дополнительные условия к математическим моделям, описывающим температурные поля, которые включают эффективную теплопроводность горной породы. По этой причине представленные эмпирические модели теплопроводности горных пород могут быть использованы в научных и научно-производственных организациях таких, как Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики филиал ОИВТ РАН, ООО «Газпром ВНИИГАЗ», АО «Башнефтегеофизика», ПГО «Тюменьпромгеофизика» и др., при решении прикладных геолого-геофизических задач, связанных оценкой тепловых свойств горных пород при прогнозировании глубинных температур.

6. Оценка содержания диссертации и автореферата

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Общий объем диссертации 271 страница, включая 77 рисунков и 10 таблиц. Основной текст диссертации составляет 245 страниц. Список литературы состоит из 211 наименований. Основные положения диссертации докладывались на международных и всероссийских конференциях. По результатам диссертационной работы изданы 3 монографии и опубликованы 32 работы в научных журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов докторских диссертаций. В их число входит 20 работ, опубликованных в научных журналах, входящих в международные реферативные базы WOS и Scopus. Получены 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Диссертационная работа является завершенным научным исследованием, обладающим актуальностью, научной новизной и практической значимостью. Содержание автореферата диссертации соответствует содержанию диссертации и отражает ее основные положения.

7. Соответствие диссертационной работы паспорту специальности

Представленная диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ:

Пункт 1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений.

Пункт 2. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.

Пункт 3. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

Пункт 4. Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурального эксперимента на основе его математической модели.

8. Замечания

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. В работе имеются некоторые опечатки, такие как на странице 51 в формуле (2.8), в нижнем пределе интегрирования пропущена единица, на странице 54 в условии на переменную t вместо границ области 0 и T указаны a и b , на странице 69 вместо равенства $C_m^n = C(x_m, t_n)$ должно быть приближенное равенство $u_m^n \approx u(x_m, t_n)$.

2. В работе автором исследовано поведение фазовых траекторий линейной динамической системы, которая описывается системой из двух дифференциальных уравнений с производными дробного порядка Капуто в случае действительных корней характеристического уравнения. Представляет интерес случай комплексных корней характеристического уравнения.

3. На рисунке 4.22 приведена фазовая траектория осциллятора Дуффинга при $\alpha=0.7$. На странице 122 в пояснении к рисунку автор указывает, что положение равновесия имеет тип центр. Однако в данном случае имеет место предельный цикл.

4. В параграфе 2 главы 5 численно исследована начально-краевая задача для системы дифференциальных уравнений неизотермической фильтрации с частной дробной производной Капуто по времени. Было бы интересно показать возможность применения разработанной разностной схемы при решении прикладных задач фильтрации флюидов в пористых горных породах.

Сделанные замечания, однако, не снижают общую положительную оценку работы.

9. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Исходя из вышеизложенного, диссертация Бейбалаева Ветлугина Джабраиловича на тему: «Математические модели динамических процессов во фрактальных и пористых средах» является завершенной научно-квалификационной работой, содержащее решение актуальной проблемы по разработке новых математических методов, численных алгоритмов и комплексов объектно-ориентированных программ для исследования нелокальных динамических процессов во фрактальных и пористых средах, совокупность которых можно квалифицировать как новое и достаточно крупное научное достижение.

Представленная работа по форме и содержанию соответствует требованиям п. 9 «Положением о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Бейбалаев Ветлугин Джабраилович, заслуживает присуждение ученой степени доктора физико-математических

наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв на диссертацию заслушан, обсужден и одобрен на совместном заседании отделов Теоретической и математической физики и Дробного исчисления Института прикладной математики и автоматизации – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук» протоколом № 8 от «31» июля 2024 года.

Заместитель директора по науке
Института прикладной математики
и автоматизации КБНЦ РАН,
доктор физико-математических наук,



Рехвиашвили С.Ш.

Почтовый адрес: 360002, КБР, г. Нальчик, Долинск, ул. Балкарова, д. 2.,
служебный телефон: (866-2) 42-65-62, адрес электронной почты:
kbncran@mail.ru.

Я, Рехвиашвили Серго Шотович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

Подпись Рехвиашвили С.Ш.
ЗАВЕРЯЮ:

*Главный ученый секретарь
КБНЦ РАН Соловьевский И.В.*

