

БЛИЕВА ДАНА НАЗАРБАЕВНА
РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ
УРАВНЕНИЙ ПОРОУПРУГОСТИ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО
МЕТОДА

АННОТАЦИЯ

Диссертация Блиевой Д.Н. на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по специальности 6D060200-Информатика.

Актуальность темы исследования. Окружающий нас мир полон примеров упруго-пористых насыщенных жидкостями сред, включая почвы, горные породы, геологические структуры, различные биологические ткани живых организмов и человека, деревьев и растений.

Математическое моделирование процессов, происходящих в пористых средах наполненных жидкостью является важным и актуальным направлением в современных исследованиях, поскольку позволяет решать важные научно-технические проблемы путем проведения, как теоретических, так и экспериментальных исследований с широким использованием вычислительных технологий.

В силу необходимости решения практических задач в различных областях геофизики, биомеханики и разработки нефтегазовых месторождений в последние десятилетия получило развитие численное моделирование процесса распространения сейсмических волн во флюидонасыщенных пористых средах. Создаваемые реалистические модели пористой среды, состоящей из упруго-деформируемой матрицы, заполненной вязкой жидкостью, позволяют объяснять наблюдаемые эффекты при сейсмических исследованиях свойств горных пород при наличии поровой жидкости.

Широкое практическое применение численного моделирования распространения сейсмических волн в насыщенной жидкостью пористой среде для решения задач в различных областях таких, как геофизика, биомеханика, нефтяная разработка привлекает к нему значительное внимание исследователей в последние годы.

Анализ развития методов и математических моделей показывает, что моделирование физических свойств пористой среды и связанные с ними исследования потоков жидкости в пористых структурах традиционно занимает одно из важных мест среди современных задач вычислительной математики и математического моделирования. Пористые среды могут представлять собой структуру различных природных и искусственных материалов, например таких, как почвы, горные породы, биологические ткани, волоконные, порошковые и вспененные металлы, керамические, полимерные и композиционные материалы. Необходимость математического моделирования физических свойств таких материалов продиктована

сложностью как теоретического, так и экспериментального исследования внутренней структуры пористых сред. Без учета такой сложности невозможно прогнозировать и оценивать эффективность применения пористых материалов в новых и модернизированных технологических процессах. Использование моделей пористых структур сильно повлияло на развитие многих областей научных исследований, таких как теории фильтрации и энергетики, механики и материаловедения, медицины и биологии, сельского хозяйства и наук о Земле.

Таким образом, в диссертации представлен алгоритм численно-аналитического решения начально-краевой задачи для симметрической системы уравнений в частных производных t -гиперболического типа. Этот результат имеет важное промышленное применение. В частности, имитационное моделирование распространения сейсмических волн применяется для сейсморазведки, как наиболее надежный геофизический метод, используемый для выявления нефтегазоносных объектов в геологических структурах, а также решающее значение для исследований в различных областях, таких как биомедицина, химическая инженерия, микро- и нанофлюидика.

Цель диссертации: Целью данной диссертационной работы является разработка алгоритма и исследование методов численно-аналитического решения начально-краевой задачи для системы динамических уравнений пороупругости, описывающей распространение сейсмических волн во флуидонасыщенной пористой среде.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- Исследовать существующие методы аналитического и численного решения динамических уравнений пороупругости, провести анализ существующих математических моделей, описывающих распространение акустических волн в упруго-пористой среде.
- исследовать модели, описывающей динамические процессы, происходящие в однослойной пористой среде, характеризуемой физическими параметрами.
- обосновать корректность постановки исходной начально-краевой задачи для решения динамических уравнений, определить условия разрешимости задачи, и получить аналитическое решение в явном виде.
- разработать эффективный алгоритм численного решения, провести численную реализацию с последующей верификацией для большой области определения пространственных переменных и реальных значений исходных физических параметров.
- Построить визуализации результатов вычислительных процессов с помощью автоматизированного интерфейса.

Объект исследования. Динамические процессы, происходящие в пороупругой среде, насыщенной жидкостью и ее физические свойства при распространении в ней сейсмических волн.

Предмет исследования. Математическая модель для двумерного случая и аппроксимирующая ее разностная схема, реалистично описывающая физические процессы, происходящие во флюидонасыщенной упругопористой среде в полуплоскости, характеризуемой различными физическими параметрами.

Методы исследования: Решается система линеаризованных динамических уравнений для двумерной задачи распространения сейсмических волн в пористых средах, записанной в терминах векторов скорости твердой матрицы и насыщающей жидкости. Для аналитического решения указанной задачи используется метод применения интегральных преобразований Фурье-Лапласа по временной и пространственной переменным. Для численного решения применена конечно-разностная противопоточная схема на разнесенной (шахматной) сетке, позволившая избежать сильных осцилляций значений сеточных функций в узлах разностной сетки.

Научная новизна работы. Разработан эффективный алгоритм численного решения динамической задачи пороупругости на высокопроизводительном языке Julia.

Теоретическая значимость исследования: Применение интегрального преобразования Фурье-Лапласа по времени и по одной из пространственных переменных позволило свести исходную начально-краевую задачу для симметрической t -гиперболической системы уравнений в частных производных к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений относительно второй пространственной переменной. Этот подход позволил теоретически сформулировать теорему о корректности постановки исследуемой задачи, определить необходимые и достаточные условия разрешимости задачи, получить выражение аналитического решения в явном виде.

Практическая значимость полученных результатов: Для численного решения дискретного аналога исходной задачи было применено несколько численных методов и использование явной конечно-разностной противопоточной схемы на разнесенной сетке позволило получить наиболее эффективный алгоритм распараллеливания вычислительных процессов. Разработан программный комплекс имитационной модели, описывающей физические процессы и свойства пороупругих сред с визуализацией, соответствующей экспериментальным наблюдениям.

Положения диссертации, выносимые на защиту: Подтверждена корректность постановки начально-краевой задачи для симметрической t -гиперболической системы уравнений в частных производных. На основе построенного аналитического решения выявлены необходимые и достаточные условия разрешимости системы уравнений.

- Разработан алгоритм параллельных вычислений численного решения динамической задачи пороупругости на основе явной конечно-разностной противопоточной схемы на разнесенной сетке. Численное решение задачи, реализованное в программном комплексе на современном языке

программирования Julia (разработан в MIT для высокопроизводительных вычислений)

- Разработан автоматизированный комплекс компьютерных программ с интерфейсом для визуализации результатов параллельных вычислительных процессов.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, трех приложений с кодами ПО и списка использованных источников из 56 наименований; содержит 113 страниц основного компьютерного текста, включая 20 рисунков и 3 таблицы.

Во **Введении** дано описание проблемы, краткий обзор предметной области. Обоснована актуальность диссертационной работы, проведен обзор литературных источников.

Первый раздел посвящен современному состоянию постановки динамической задачи пороупругости на основе модели Доровского и рассмотрена постановка задачи для двумерного случая, которая представляет собой систему из восьми уравнений в частных производных с начальными и краевыми условиями.

Во **втором разделе** исследуется корректность постановки исходной задачи, условия ее разрешимости и получение аналитического решения в явном виде с помощью применения интегрального преобразования Фурье-Лапласа.

В **третьем разделе** представлен алгоритм численного решения поставленной задачи на основе конечно-разностной явной схемы на разнесенной сетке.

Четвертый раздел посвящен описанию численных экспериментов и автоматизированного комплекса компьютерных программ для визуализации полученных результатов, описывающих физические процессы, происходящие при распространении акустических волн во флуидонасыщенной пористой среде.

В **заключении** сформулированы полученные в работе основные результаты и их значение для области знания, в которой они относятся, а также для области их практического применения.

В **приложении А** приведен код на MatLab для получения аналитического решения, приведенного во втором разделе.

В **приложении Б** приведен код на языке программирования Julia для численного решения динамической задачи.

В **приложении В** приведен код на языке HTML для автоматизированного вычислительного процесса с удобным интерфейсом ввода данных и выводом на дашборд визуализации результатов вычислений.

Уровень достоверности и результаты апробации. Обоснованность и достоверность исследования соответствуют предъявляемым требованиям

Основные положения диссертации прошли апробацию и изложены в 15 печатных работах, из них:

- 2 статьи в международных научных журналах, индексируемых в Web of Science с высоким импакт-фактором Q1: (Computer Science – miscellaneous),
- 4 статьи в журналах из списка, рекомендованного Комитетом по контролю в сфере образования и науки МНВО РК (ККСОН):
- 9 публикаций в материалах международных и республиканских конференций и докладов на научных семинарах:
 - на Международной научно-практической конференции «Российская наука в современном мире», май 2018, РФ, г. Москва,
 - Научной конференции Института информационных и вычислительных технологий МОН РК "Современные проблемы информатики и вычислительных технологий", г. Алматы, 2-5 июля 2018 г.
 - на II международной научно-практической конференции «Современная мировая экономика: проблемы и перспективы в эпоху развития цифровых технологий и биотехнологии»/ International Scientific and Practical Conference: «Modern world economy: problems and prospects in the era of the development of digital technologies and biotechnology», 15-16 мая 2019 года. г. Москва
 - на I Международной конференции по трансферу между математикой и индустрией/ I Conference on Transfer between Mathematics & Industry (CTMI 2019), 22-24 июля 2019 г. г. Сантьяго де Компостела, Испания.
 - на Международной научной конференции «Inverse problems in finance, economics and life sciences». 31 августа – 4 сентября 2019, г. Алматы.
 - IV международной научно-практической конференции "Информатика и прикладная математика", посвященной 70-летию юбилею профессоров Биярова Т.Н., Вальдемара Вуйцика и 60-летию профессора Амиргалиева Е.Н., 25-29 сентября 2019, Алматы, Казахстан
 - в докладе на Семинаре по дифференциальным уравнениям и функциональному анализу, организованному Институтом математики в сотрудничестве с департаментом по статистике, математическому анализу и оптимизации Университета Сантьяго де Компостела, 24 октября 2019г., г. Сантьяго де Компостела, Испания.
 - на заседаниях научного семинара Института информационных и вычислительных технологий КН МОН РК
 - на научном семинаре кафедры информатики факультета информационных технологий КазНУ им. аль-Фараби.
 - на научном семинаре профессора Эдрисса Тити на математическом факультете университета Texas A&M University. Профессор Эдрисс Тити также является деканом математического факультета в University of Cambridge.