

МИНИСТЕРСТВО  
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Национальный  
исследовательский ядерный  
университет «МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)»**

Каширское шоссе, д.31, г. Москва, 115409  
Тел. (499) 324-77-77, факс (499) 324-21-11  
<http://www.mephi.ru>

УТВЕРЖДАЮ



и.о. ректора НИЯУ МИФИ,

Д. Ф. М. Н.

Нагорнов О.В.

« 04 » июля 2023 г.

04.07.2023 № 97-3/23

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу  
Аммосова Дмитрия Андреевича

**«Многомасштабное моделирование многофизических задач с упругими деформациями»**,

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

**Актуальность.** Диссертация посвящена проблеме адекватного математического моделирования многофизических процессов с упругими деформациями. Моделирование данных процессов имеет приложения в материаловедении, инженерном проектировании, разработке месторождений и т.д. Основной трудностью при моделировании многофизических процессов с упругими деформациями является высокая вычислительная стоимость. Во-первых, во многих прикладных задачах среда содержит различные неоднородности такие как трещины, включения и перфорации. При этом точное моделирование требует учета всех неоднородностей среды, так как они могут существенно повлиять на решение. Для этого нужно использовать подробные вычислительные сетки, что ведет к увеличению числа степеней свободы. Во-вторых, многофизические задачи зачастую определяются системой уравнений для нескольких искомого полей. Таким образом, размер дискретной системы увеличивается кратно количеству полей решения. Прямое решение подобных дискретных систем требует значительных вычислительных ресурсов. Развиваемые в диссертации многомасштабные алгоритмы позволяют существенно снизить размерность дискретных систем с помощью построения многомасштабных базисных функций, учитывающих мелкомасштабные неоднородности среды. В связи с вышеизложенным тема диссертационной работы является актуальной.

**Научная новизна работы** заключается в разработке эффективных многомасштабных методик и алгоритмов для решения многофизических задач с упругими деформациями в неоднородных средах. Полученные в диссертационной работе результаты являлись новыми на момент их опубликования, а разработанные подходы могут успешно использоваться для решения практических задач, включающих в себя моделирование многофизических процессов с упругими деформациями в неоднородных средах.

Потенциальными потребителями результатов работы могут быть научные и промышленные институты в области математического моделирования процессов геофизической направленности, а также компании-разработчики нефтегазовых месторождений, нефтесервисные компании.

В диссертационной работе изложены и обоснованы новые подходы к численному моделированию процессов в пространственно неоднородных средах, предложены алгоритмические и программные решения, реализованные в пакетах прикладных программ.

**Содержание работы.** Диссертационная работа объемом 140 страниц включает введение, четыре главы, заключение, список литературы и одно приложение. Иллюстрации представлены 17 таблицами и 53 рисунками. Список литературы содержит 157 наименований.

**Во введении** обосновывается актуальность исследований, формулируется цель, описываются задачи и основные результаты, выносимые на защиту, приводятся обоснованность и достоверность результатов, а также сведения об апробации и основных публикациях автора по теме диссертации. В конце введения кратко излагается содержание четырех основных глав.

**В первой главе** рассматривается многомасштабное моделирование морозного пучения грунта. Для этого используется нелинейная математическая модель термоупругости, в которой деформации грунта являются следствием изменения его пористости ввиду отличия плотностей воды и льда. В качестве эталонного метода решения рассматривается метод конечных элементов на подробной вычислительной сетке. Для решения на грубой сетке разрабатываются два многомасштабных алгоритма. Первый алгоритм (офлайн) не учитывает изменения свойств среды, которые вызваны фазовым переходом. Во втором алгоритме (онлайн) учет изменений свойств среды происходит путем вычисления онлайн многомасштабных базисных функций в определенных временных шагах. Численные результаты представлены для двумерной тестовой задачи морозного пучения неоднородного грунта со включением, производится сравнение с эталонным решением. Оба многомасштабных алгоритма показали высокую точность при меньшей размерности дискретной задачи. При этом онлайн алгоритм ожидаемо показал меньшие погрешности.

**Вторая глава** посвящена разработке многомасштабного алгоритма для решения задачи термопоупругости в трещиноватой среде. В главе приводится вывод математической модели, а также аппроксимация на подробной вычислительной сетке с помощью метода конечных элементов. В многомасштабном алгоритме строятся базисные функции для давления, температуры и векторного поля перемещения. Численные результаты представлены для двумерных и трехмерных задач в неоднородной и трещиновато-пористой средах. Во всех тестовых задачах предложенный многомасштабный алгоритм показал высокую точность при значительном сокращении размерности дискретной задачи.

**В третьей главе** рассматривается многомасштабное моделирование неоднородных пьезоэлектрических материалов. Для этого используется стационарная модель пьезоэлектричества, а также приводится ее аппроксимация на подробной вычислительной сетке. Разрабатываются два многомасштабных алгоритма. В первом алгоритме строятся расщепленные базисные функции для каждого поля решения. В то время как во втором вычисляются связанные базисные функции, которые учитывают взаимодействие физических процессов. Численные результаты представлены для двумерных задач в неоднородной и композитной средах. Предложенные алгоритмы показали высокую эффективность, однако связанные базисные функции лучше аппроксимировали эталонное решение.

**Четвертая глава** посвящена разработке многомасштабных алгоритмов для моделирования неоднородной упругой среды Коссера. В главе приводится вывод

двумерной модели Коссера и ее аппроксимация на подробной вычислительной сетке. Для данной задачи также строятся расщепленные и связанные базисные функции. Численные результаты представлены для тестовых двумерных задач в различных неоднородных средах. Многомасштабные алгоритмы продемонстрировали высокую точность при меньшем числе степеней свободы (по сравнению с эталонным решением). Связанные базисные функции показали лучшие результаты.

**В заключении** сформулированы основные результаты, соответствующие заявленной цели работы и положениям, выносимым на защиту.

**Достоверность и степень обоснованности** обеспечивается использованием корректно построенных математических моделей и тестированием разработанных многомасштабных алгоритмов на ряде тестовых задач, сравнением с решениями на подробной вычислительной сетке.

Положения, выносимые на защиту, являются новыми, вполне обоснованы, достоверны и полностью опубликованы в ведущих научных журналах, для которых актуальность, новизна и достоверность являются необходимыми условиями публикации.

Диссертационная работа является законченным научным исследованием, все части которого связаны между собой объектом исследования и единым подходом.

Диссертация хорошо структурирована и написана хорошим русским языком.

Автором опубликовано 11 статей по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК. Значительная доля этих работ проиндексирована в базах Scopus и Web of Science и опубликована в журналах, относящихся к первому или второму квартилю. Представлен список конференций (12 конференций), на которых докладывались основные результаты. Получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

#### **Замечания по диссертационной работе.**

1. В диссертации и автореферате не представлено обоснование соответствия диссертации паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.
2. На стр. 17 диссертации приведена математическая формулировка граничных условий, но не раскрыт физический смысл этих условий.
3. Насколько нам известно, словосочетание «алгоритмы офлайн и онлайн метода конечных элементов» в русскоязычной научной литературе никем кроме автора диссертации и его соавторов не используется. Во введении к диссертации хотелось бы увидеть подробное объяснение этих терминов.
4. Несмотря на то, что на защиту выносятся алгоритмы численных методов, в диссертации нет ни одной блок-схемы алгоритмов, что затрудняет их восприятие.
5. Сравнение вычислительной эффективности предложенного метода по сравнению с моделированием на мелкомасштабной сетке присутствует только для расчетов, представленных в четвертой главе. Однако даже в этой главе не указаны затраты времени на получение дополнительных базисных функций, необходимых для учета мелкомасштабных процессов. Из текста диссертация нельзя понять, какой подход является более эффективным, если требуется сделать только один расчет и повторное использование предварительного этапа получения базисных функций не потребуется.
6. На защиту выносятся алгоритмы обобщенного метода конечных элементов, однако, из разделов «Выводы» для глав 1, 2 и 4 следует, что в этих главах предложен подход.

Указанные замечания носят скорее редакционный и рекомендательный характер и не влияют на отличную оценку всей работы.

### **Заключение.**

Диссертационная работа Аммосова Дмитрия Андреевича «Многомасштабное моделирование многофизических задач с упругими деформациями» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне. Работа актуальна, а полученные автором результаты достоверны и математически обоснованы.

Основные научные результаты опубликованы в авторитетных рецензируемых научных изданиях, в том числе из списка ВАК. Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации, которое соответствует паспорту научной специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, а именно п. 2, 3, 8.

Диссертационная работа соответствует всем требованиям ВАК РФ и критериям, установленным действующим Положением о присуждении ученых степеней, предъявляемым диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Аммосов Дмитрий Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Диссертация соискателя рассмотрена на научном семинаре института лазерных и плазменных технологий (ЛаПлаз) НИЯУ МИФИ 03.07.2023 г. Отзыв был одобрен по результатам голосования: «за» – 12 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел.

Отзыв подготовил заведующий  
суперкомпьютерного моделирования  
инженерно-физических процессов  
Института лазерных и плазменных  
технологий НИЯУ МИФИ  
д. ф.-м.н.

  
В.А. Шаргатов

Директор института лазерных и  
плазменных технологий НИЯУ МИФИ  
д. ф.-м. н., профессор

  
А.П. Кузнецов

Председатель совета по аттестации и  
подготовке научно-педагогических кадров  
НИЯУ МИФИ,  
д. ф.-м. н., профессор

  
Н.А. Кудряшов

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Адрес: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31  
Телефон: +7 495 788-5699, +7 499 324-7777  
Сайт: <https://mephi.ru/>  
e-mail: [info@mephi.ru](mailto:info@mephi.ru)