**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.331.05,**

**СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО**

**БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО**

**ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ**

**ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА**

**(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

**(МГТУ им. Н.Э. Баумана),**

**ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ**

**КАНДИДАТА НАУК**

аттестационное дело № \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 17.12.2024 г. № \_\_\_

О присуждении **Соколову Андрею Александровичу**, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата физико-математических наук.

**Диссертация** «Математические модели нелокальной термоупругости и их численная реализация» по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ принята к защите 15 октября 2024 года (протокол заседания № 4) диссертационным советом 24.2.331.05, созданным на базе МГТУ им. Н.Э. Баумана, Министерство образования и науки РФ, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1, приказ №75/нк от 15 февраля 2013 г.

**Соискатель** Соколов Андрей Александрович, 1997 года рождения, в 2021 году окончил магистратуру кафедры прикладной математики МГТУ им. Н.Э. Баумана по направлению подготовки 01.04.04 — Прикладная математика. Является аспирантом четвёртого года обучения очного отделения аспирантуры кафедры прикладной математики МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Диссертация выполнена на кафедре прикладной математики МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Научный руководитель** — Савельева Инга Юрьевна, доктор физико-математических наук, доцент, исполняющий обзанности заведующего кафедры прикладной математики МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Официальные оппоненты:**

**Бураго Николай Георгиевич,** доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского Российской академии наук;

**Савенков Евгений Борисович,** доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук.

**дали положительные отзывы на диссертацию.**

**Ведущая организация:** федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», механико-математический факультет, в своём положительном заключении, подписанном заведующим кафедрой механики композитов Владимиром Ивановичем Горбачевым, доктором физико-математических наук, профессором, указала, что диссертационная работа Соколова Андрея Александровича на тему «Математические модели нелокальной термоупругости и их численная реализация» является завершенной научно-квалификационной работой, которая по объему, актуальности, степени научной новизны, а также теоретической и практической значимости полученных результатов полностью удовлетворяет требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Положительное заключение содержит замечания:

1. Во введении работы фигурирует термин «структурно-чувствительные материалы». Было бы уместно более чётко определить это понятие, так как не до конца ясно, какой класс материалов следует называть структурно-чувствительным.

2. В определении интегрального нелокального оператора (1.1) фигурируют следующие параметры: весовые параметры и , функция нелокального влияния и область нелокального влияния , которые в дальнейшем становятся частью уравнений теплопроводности и равновесия. Какие из этих параметров являются материальными и могут быть установлены из экспериментов?

3. Следовало подробное объяснение происхождения формулы (1.1.), так как, как выясняется далее, оно является фундаментальным соотношением для данной диссертационной работы.

4. Из содержания текста перед формулой (1.2) видно, что эту формулу следовало записать для двумерной области, однако содержание текста после этой формулы указывает на то, что оно представлено для трёхмерной области.

5. Следует также отметить, что без каких-либо объяснений представлены формулы (1.3), (1.5) и (1.6). Ссылки на замечательные работы [37-39] не совсем уместны, так как в этих работах рассматриваются «определяющие уравнения», «уравнение теплопроводности» и «уравнения движения» для математической модели нелокальной термовязкоупругой среды.

6. Не указаны в формулах индексы какие значения принимают, а также не указано на суммирование по повторяющимися индексам.

7. На 27-ой странице при получении последних двух соотношений, которые применяются на в дальнейшем, интегрирование по частям некорректно осуществлено.

8. На 31-ой странице на 7-ой и 8-ой строках сверху написано: «… представим векторы … в виде тензоров второго ранга, …» Это высказывание некорректно, так как векторы нельзя представить в виде тензоров второго ранга.

**Соискатель** имеет 5 опубликованных работ по теме диссертации в изданиях, индексируемых в библиографических базах данных Scopus и Web of Science, либо включенных в перечень ВАК РФ, и 1 зарегистрированный программный комплекс.

**Список работ по теме диссертации:**

1. Kuvyrkin G. N., Savelyeva I. Y., Sokolov A. A. Features of the software implementation of the numerical solution of stationary heat equation taking into account the effects of nonlocal finite element method // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1479. No. 1. (0,4 п.л./0,2 п.л.)

2. Kuvyrkin G. N., Savelyeva I. Y., Sokolov A. A. 2D nonlocal elasticity: In vestigation of stress and strain fields in complex shape regions // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 2023. Vol. 103. No. 3. (0,6 п.л./0,3 п.л.)

3. Кувыркин Г. Н., Соколов А. А. Принцип Сен-Венана в задачах нело­кальной теории упругости // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2023. Т. 109. № 4. С. 4—17. (0,55 п.л./0,3 п.л.)

4. Mathematical modeling of insulating coating of thermal conductivity in cluding body`s own radiation and non-local spatial effects / A. A. Sokolov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2024. Vol. 2817. No. 1. P. 12—28. (0,35 п.л./0,1 п.л.)

5. Кувыркин Г. Н., Соколов А. А. Решение задачи о напряженно-деформированном состоянии пластины с эллиптическим вырезом при механических и температурных нагружениях в нелокальной постановке // Прикладная механика и техническая физика. 2024. № 4. С. 193—203. (0,4 п.л./0,2 п.л.)

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021661966. NonLocFEM / А. А. Соколов, И. Ю. Савельева. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 20.07.2021.

В работе [1] Соколовым А.А. разработан алгоритм решения двумерного интегро-дифференциального уравнения нелокальной теплопроводности, проанализирована алгоритмическая сложность и решена задача теплопроводности о прохождении теплового потока сквозь прямоугольную пластину. В работе [2] Соколов А.А. рассмотрел задачу нелокальной упругости, в которой изучал особенности решений на области со ступенчатым переходом, где были выявлены особенности, связанные с полем деформации в окрестности концентратора решений. В работе [3] Соколовым А.А. изучена применимость принципа Сен-Венана к модели нелокальной упругости, в работе [4] — модель двумерной нелокальной теплопроводности с радиационным излучением на границе, а в работе [5] — нелокальная задача Кирша с обобщением на эллиптические вырезы; также в данной работе был проведён анализ температурных напряжений возникающих на той же области при прохождении через неё теплового потока. Все исследования были выполнены при помощи разработанного автором программного комплекса NonLocFEM [6].

**На диссертацию и автореферат поступили отзывы от:**

1. Института общеинженерной подготовки федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)». Отзыв подписан доктором физико-математических наук, доцентом кафедры «Сопротивление материалов, динамика и прочность машин» Федотенковым Григорием Валерьевичем.

2. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института системного программирования им. В.П. Иванникова Российской академии наук (ИСП РАН). Отзыв подписан кандидатом технических наук, старшим научным сотрудником Стрижаком Сергеем Владимировичем.

3. Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)». Отзыв подписан кандидатом технических наук, доцентом, главным специалистом Ступиным Дмитрием Дмитриевичем.

**Все отзывы положительные**. Отзывы содержат следующие замечания.

1. В автореферате не указаны допустимые соотношения размеров элементов сетки и радиуса нелокального влияния. Также не совсем ясен принцип, по которому можно перейти от одного способа аппроксимации области нелокального влияния к другому.

2. Не ясным остаётся способ оценки эффективности распараллеливания алгоритма ассемблирования матриц теплопроводности и жёсткости. Почему в локальном случае рассмотрения классических матриц эффективность распараллеливания ниже, чем в нелокальном?

3. С учётом того, что основой численного метода является метод конечных элементов, не совсем ясна целесообразность создания собственного программного комплекса вместо написания модуля к уже существующим. Это бы позволило решать более сложные задачи и сосредоточить внимание на математической стороне вопроса. Сам выбор метода конечных элементов не совсем понятен: почему приоритет отдан именно ему, а не, например, методу контрольных объёмов, обеспечивающему строгое выполнение балансовых соотношений.

4. В автореферате нет указаний на примеры решения каких-либо практических задач. Кроме того, не вполне понятно, из какх физических экспериментов можно установить параметры, характеризующие нелокальные свойства материала (вид функции нелокального влияния, характерный размер носителя этой функции, весовые параметры). Всё это несколько снижает практическую ценность представленных результатов.

5. Отсутствуют какие-либо оценки абсолютных затрат времени на выполнение расчётов, хотя бы по сравнению с решением аналогичных по постановке задач, но в рамках классических («локальных») моделей. Нет данных по эффективности распараллеливания алгоритма при использовании технологии MPI.

6. В автореферате были приведены два семейства функций нелокального влияния, но не были описаны различия между ними. В связи с этим представляется неясным, из каких соображений нужно выбирать ту или иную функцию нелокального влияния и другие параметры нелокальной модели. Кроме того, автореферат представляется несколько перегруженным в плане различных формул, возможно, в ущерб объяснениям полученных результатов с точки зрения физического смысла.

Выбор оппонентомдоктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем механики имени А.Ю. Ишлинского Российской академии наукБураго Николая Георгиевича обусловлен его достижениями в разработке аналитических и численных методов и алгоритмов решения задач механики деформируемого твердого тела.

Выбор оппонентом доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника федерального исследовательского центра Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук, Савенкова Евгения Борисовича связан с тем, что он является специалистом в области математического моделирования, разработки и применения численных методов для решения широкого класса задач механики сплошной среды.

Выбор федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» в качестве ведущей организации обусловлен тем, что данный университет является одним из лидеров в стране в области математического моделирования, численных методов и вычислительных технологий, представлен следующими ведущими специалистами.

Доктор физико-математических наук, профессор Никабадзе Михаил Ушангиевич является специалистом в области неклассических моделей микронеоднородных сред (микрополярные среды, наноструктуры).

Заведующий кафедрой теории упругости, профессор РАН, доктор физико-математических наук, профессор Георгиевский Дмитрий Владимирович – признанный специалист в области нелинейных моделей механики сплошной среды, а также в области многомасштабного моделирования.

Доктор технических наук, профессор Лурье Сергей Альбертович является специалистом в области градиентной теории упругости, механики нанокомпозитных материалов и метаматериалов.

Заведующий кафедрой механики композитов, доктор физико-математических наук, профессор Горбачев Владимир Иванович — известный специалист в области моментных моделей упругости, а также термоупругости нанокомпозитов.

**Диссертационный совет отмечает**, что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработаны** численные алгоритмы решения уравнения стационарной теплопроводности и равновесия в нелокальных постановках на основе метода конечных элементов для исследования полей температуры, плотности теплового потока, перемещений, деформации и напряжений; предложенные алгоритмы адаптированы для вычислений на многопроцессорных вычислительных машинах с общей и распределённой памятью;

**разработан** программный комплекс NonLocFEM, в рамках которого были реализованы все предложенные в работе алгоритмы, в частности, алгоритмы ассемблирования матриц теплопроводности и жёсткости; алгоритмы аппроксимации области нелокального влияния, использующие k-d деревья; алгоритмы балансировки данных; алгоритмы предобуславливания и решения систем линейных алгебраических уравнений.

**исследованы** два параметрических семейства функций нелокального влияния, проведён сравнительный анализ влияния параметров функций на отклонения решений относительно классических;

**исследованы** принципы Сен-Венана и стабильности тепловых потоков в контексте нелокальных постановок задач: показано, что вдали от точек приложения тепловых или механических нагружений, кривые напряжения и плотности теплового потока сливаются в единые поверхности, которые характеризуются наличием кромочного эффекта на свободных от условий границах;

**исследованы** решения в областях с концентраторами полей напряжения и плотности теплового потока на примере решения задач о растяжении Т-образной пластины и задачи Кирша с обобщением на эллиптические вырезы; полученные решения демонстрируют снижение роли концентраторов в решениях;

**исследованы** возможности ускорения сходимости метода сопряжённых градиентов при решении систем алгебраических уравнений, полученных после дискретизации уравнений стационарной теплопроводности и равновесия в нелокальных постановках при помощи метода конечных элементов.

**Теоретическая значимость исследования обоснована** тем, что рассматриваемая математическая модель, описывающая термомеханическое состояние среды с учётом пространственной нелокальности, позволяет моделировать внутренние термодинамические эффекты, такие как кромочные эффекты.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для** **практики** состоит в разработанных алгоритмах ассемблирования матриц теплопроводности и жёсткости с учётом пространственной нелокальности, их адаптации под многопроцессорные вычислительные системы и реализацию в виде собственного программного комплекса, который позволяет проводить расчёты на неструктурированных сетках, образующих области произвольной формы. Программный комплекс обрабатывает структурированные запросы, что даёт широкие возможности пользователю для настройки параметров модели и расчёта. Модульная структура программного комплекса позволяет добавлять новые типы расчётов в программу, не меняя общей структуры программы.

**Оценка достоверности результатов исследования** выявила следующее:

* результаты получены с помощью использования строгого математического аппарата и согласуются с известными результатами других авторов;
* работоспособность предложенных методов подтверждена результатами математического моделирования.

**Личный вклад соискателя.** Все исследования, изложенные в диссертации, выполнены соискателем лично в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций включен только тот материал, который принадлежит соискателю.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие **критические замечания**:

1. Во введении работы фигурирует термин «структурно-чувствительные материалы». Было бы уместно более чётко определить это понятие, так как не до конца ясно, какой класс материалов следует называть структурно-чувствительным.

2. Для предобуславливания системы линейных алгебраических уравнений конечно-элементных аппроксимаций использован алгоритм неполного разложения Холецкого. Детали его реализации не приводятся. Вместе с тем, в настоящее время существуют достаточно эффективные параллельные (MPI, OpenMP) реализации неполного разложения Холецкого, например, в свободной и бесплатной библиотеке SuperLU. Использование подобных библиотек сделало бы параллельной самую вычислительно «тяжелую» часть программной реализации и позволило бы рассматривать задачи существенно большей сеточной размерности. Так же автору следует рассмотреть возможность использования предобуславливателей на основе многосеточного метода, имеющих практически идеальную масштабируемость и «по-элементных» («element-by-element») предобуславливателей.

3. В определении интегрального нелокального оператора (1.1) фигурируют следующие параметры: весовые параметры p\_1 и p\_2, функция нелокального влияния φ и область нелокального влияния S'(x), которые в дальнейшем становятся частью уравнений теплопроводности и равновесия. Какие из этих параметров являются материальными и могут быть установлены из экспериментов?

Соискатель Соколов А.А. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привёл собственную аргументацию

1. Термин структурно-чувствительные материалы подразумевает под собой материалы, которые состоят из зёрен, связи между которыми образуют упорядоченные структуры и свойства которых могут зависеть от конфигурации этих структур. Как правило к таким материалам относятся наноматериалы, в частности нанокомпозиты.

2. Основная идея в использовании неполного разложения Холецкого заключается в том, что раскладывается лишь локальная матрица жёсткости, которая занимает значительно меньше оперативной памяти и для её разложения требуется значительно меньше вычислительных ресурсов, поэтом использование таких «серьёзных» библиотек не требуется. Построение предобуславливателей на основе многосеточных методов требует дополнительной адаптации под рассматриваемый в работе класс нелокальных моделей, на текущей момент такие предобуславливатели пока не рассматривались.

3. Все параметры модели не являются материальными, а являются модельными параметрами. Для их установления необходимо провести серию экспериментов, после чего необходимо провести регрессионный анализ для вычисления параметров модели.

На заседании 17 декабря 2024 года **диссертационный совет принял решение** присудить Соколову Андрею Александровичу учёную степень кандидата физико-математических наук.

В тайном голосовании участвовало \_\_\_\_ членов диссертационного совета из \_\_\_\_ присутствующих. При проведении тайного голосования **диссертационный совет** в количестве \_\_\_\_ человек, из них \_\_\_\_ докторов по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (\_\_\_\_ технические науки, \_\_\_\_ физико-математические науки), участвоваших в заседании, из \_\_\_\_ человек, **проголосовали**: **за** – 18 , **против** – 0, **недействительных бюллетеней** – 0.

Председатель

диссертационного совета, Зимин

д.т.н., с.н.с Владимир Николаевич

Учёный секретарь

диссертационного совета, Аттетков

к.т.н., доцент Александр Владимирович

«17» декабря 2024 г.