**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 12 сентября 2024 года (протокол заседания № 2) 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, обучается на четвёртом курсе аспирантуры на кафедре прикладной математики МГТУ им. Н.Э. Баумана. Работает в должности ассистента 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 докторским диссертациям.

Положительное заключение содержит замечания:

1. В названии работы фигурирует термин «структурно-чувствительные материалы». В начале работы было бы уместно более четко определить это понятие, являющееся, как потом следует, основным объектом исследования. В противном случае у читателя встает вопрос, какие из встречающихся по ходу изложения моделируемых эффектов относятся к структурной чувствительности, а какие нет.

2. В соотношении (1.13), с. 27, введены веса  и  локальной и нелокальной составляющих деформаций, активно используемые в дальнейшем в ходе выкладок. Каков их «статус» в предлагаемой модели? Являются ли они материальными параметрами среды (если да, то из каких установочных экспериментов их можно найти?) или их выбирает исследователь из каких-либо соображений?

3. Более общие определяющие соотношения (1.24), с. 31, отличаются от (1.25) наличием внутренних параметров состояния. Тем не менее названия у этих моделей практически одинаковые – линейная нелокальная термоупругая среда, что, видимо, терминологически не совсем удачно.

**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.

**Наиболее значительные работы 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.)

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.

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

1.    Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет». Отзыв подписан Заслуженным деятелем науки РФ, доктором физико-математических наук, профессором, заведующим кафедрой теории упругости Александром Ованесовичем Ватульяном.

2.   Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета. Отзыв подписан доктором физико-математических наук, старшим научным сотрудником, заведующим отделом механики деформируемого твердого тела Сергеем Васильевичем Пономарева.

3.   Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)». Отзыв подписан доктором физико-математических наук, профессором, заведующим кафедрой 903 «Перспективные материалы и технологии аэрокосмического назначения» Львом Наумовичем Рабинским.

4.   Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». Отзыв подписан доктором технических наук, доцентом, деканом аэрокосмического факультета Владимиром Яковлевичем Модорским.

5.   Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша Российской академии наук». Отзыв подписан доктором физико-математических наук, ведущим научным сотрудником Евгением Борисовичем Савенковым.

6.   ФГБУН Институт системного программирования им. В.П. Иванникова Российской академии наук. Отзыв подписан доктором физико-математических наук, академиком РАН, директором Аветисяном Арутюном Ишхановичем.

Все отзывы положительные. Отзывы содержат следующие замечания.

1.   В автореферате недостаточно описан вклад зарубежных исследователей, внесших существенный вклад в развитие нелокальной механики и теплопроводности.

2.   Принципиальный и важный вопрос – выбор функций нелокального влияния. Чем в работе обусловлен выбор тех или иных модельных функций нелокального влияния и есть ли экспериментальные данные в пользу выбора той или иной функции? Какие из них дают описание температурных и механических полей наиболее близкие к данным эксперимента?

3.   Нечетко сформулированное определение структурно-чувствительной среды, а также отсутствие описания подходов к экспериментальному определению параметров, отвечающих за нелокальные свойства сред.

4.   В автореферате не представлена модификация метода конечных элементов, описана только аппроксимация зоны нелокальности.

5.   Для динамической задачи термовязкоупругости приведены не все значения параметров, которые были использованы для построения графиков на рис. 2 (не указаны значение радиуса нелокальности, значение параметра *m*).

6.   Не вполне ясна методика выбора функции, задающей степень влияния нелокальных эффектов в среде, и не указан конкретный вид этой функции при проведении расчетов, результаты которых представлены в тексте.

7.   Следовало бы реализовать рассмотренные модели в виде программных модулей для каких-либо широко распространенных конечноэлементных программных комплексов. Это позволило бы, как представляется, рассмотреть задачи при более тщательной дискретизации геометрических моделей и сделать серьезный шаг к внедрению предложенных моделей и методов в практику расчетов при решении актуальных задач.

8.   Модификация метода конечных элементов практически не описана в автореферате

9.   Как показывает опыт, любая исследовательская деятельность, связанная с прикладными вопросами, приводит к достижению целей лишь тогда, когда она опирается на фундаментальные исследования, связана с образовательным процессом и внедряется в прикладные разработки. Объем проведенных фундаментальных исследований вызывает восхищение, работа автора в ведущем техническом университете снимает вопросы о связи с образовательной стороной, однако вопросы конкретных практических приложений и внедрения разрабатываемых моделей в автореферате практически не затронуты. При том, что потребность в таких моделях ощущается, их внедрение могло бы позволить отказаться от эмпирики и подвести под современные технологии прочный фундамент.

10.   С учетом того, что основой для численного моделирования на основе разработанных моделей является метод конечных элементов, не ясно, с какой целью автором разрабатывались собственные вычислительные алгоритмы вместо создания соответствующих модулей для широко распространенных и активно развиваемых программных комплексов конечно-элементного анализа. Последнее позволило бы автору сосредоточиться на математической стороне дела и одновременно воспользоваться преимуществами хорошо оптимизированных алгоритмов. Одновременно был бы сделан серьезный шаг в направлении практического применения созданных моделей к решению индустриальных задач.

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.

Имеет 49 публикаций за последние 5 лет, из них 10 – в журналах, входящих в Web of Science или Scopus, 9 – в журналах, входящих в текущий перечень ВАК РФ, 27 – по теме диссертации.

1.   Явно-неявные схемы расчёта динамики упруговязкопластических сред с малым временем релаксации / Бураго Н. Г. [и др.] // Дифференциальные уравнения. 2023. Т. 59, № 6. С. 803-813.

2.   Multi-mode Model and Calculation Method for Fatigue Damage Development / Burago N. G. [et al.] // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2021. Vol. 217. P. 157-170.

3.   Burago N. G., Nikitin I. S. Mathematical Model and Algorithm for Calculating Pressing and Sintering // Mathematical Models and Computer Simulations. 2019. Vol. 11, No. 5. P. 731-739.

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 известным специалистом в области математического моделирования, а также разработки и применения численных методов для решения широкого класса задач механики сплошной среды.

Имеет 21 публикаций за последние 5 лет, из них 15 – в журналах, входящих в Web of Science или Scopus, 8 – в журналах, входящих в текущий перечень ВАК РФ, 11 – по теме диссертации.

1.   On the Theory of Methane Hydrate Decomposition in a One-Dimensional Model in Porous Sediments: Numerical Study / Koldoba A.V. [et al.] // Mathematics, 2023, 11(2), 341.

2.   Колдоба А.В., Скалько Ю.И. Численное моделирование распространения прямоточных волн внутрипластового горения в инверсном режиме // Компьютерные исследования и моделирование. 2020. Т. 12. № 5. С. 993-1006.

3.   Model, calculation method and visual representation of residual stresses in laser sintering of metal powders / Koldoba A.V. [et al.] // Scientific Visualization. 2019. Vol. 11, No. 5. P. 26-34.

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.

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.

Заслуженный профессор Московского университета, доктор физико-математических наук, профессор Бровко Георгий Леонидович – крупный специалист в области неклассических моделей микронеоднородных сред (моментные среды, континуум Коссера, наноструктуры), а также в области моделирования гетерогенных сред и неоднородных структур.

Доктор физико-математических наук, профессор Молодцов Игорь Николаевич является специалистом в области динамических задач теории упругости, вязкоупругости, пластичности.

Доктор физико-математических наук, профессор Леонова Эмилия Александровна является специалистом в области нелинейных теорий термомеханики, в частности, вязкопластичности и упругости.

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

**разработаны** определяющие соотношения новых математических моделей, описывающих термомеханические процессы с учетом пространственной и временной нелокальностей в структурно-чувствительных материалах, в том числе соотношения двойственной вариационной формы математической модели процессов стационарной теплопроводности в области произвольной формы с учетом пространственных нелокальных эффектов;

**исследованы** аналитические решения одномерных задач стационарной теплопроводности для неограниченной в своей плоскости пластины и деформировании цилиндрического стержня с учетом пространственной нелокальности;

**получены** оценки, в том числе двусторонние, эффективных коэффициентов теплопроводности, упругих модулей и температурного коэффициента линейного расширения композитов, позволившие учесть тип и объемную концентрацию армирующих включений, особенности теплового контакта и теплопереноса между включениями и матрицей, наличие промежуточного слоя, взаимное расположение и возможную анизотропию включений;

разработанные интегральная и вариационная форма математической модели установившейся теплопроводности **позволили оценить** целесообразность использования конкретных материалов в элементах конструкций, надежное функционирование которых связано с температурным состоянием материала;

**разработаны** одномерные и двумерные численные алгоритмы нелокального метода конечных элементов для исследования полей температуры, деформации и напряжений в структурно-чувствительном материале;

**разработан** программный комплекс NonLocFEM, в котором численные алгоритмы нелокального метода конечных элементов использованы для моделирования термомеханических процессов в материалах при различных внешних воздействиях.

**Теоретическая значимость исследования обоснована** тем, что разработана иерархия новых математических моделей, описывающих термомеханические процессы с учетом пространственной и временной нелокальностей в структурно-чувствительных материалах, в том числе новые двойственные вариационные формы математических моделей процессов стационарной теплопроводности и термоупругости в области произвольной формы с учетом пространственных нелокальных эффектов. Теоретический интерес имеют полученные аналитические решения одномерных задач стационарной теплопроводности для неограниченной в своей плоскости пластины и деформировании цилиндрического стержня с учетом пространственной нелокальности.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для** **практики** состоит в том, что созданный алгоритм сборки нелокальной матрицы жесткости позволяет разработанную модель учета пространственной нелокальности транслировать на другие задачи механики деформируемого твердого тела. Разработанный собственный программный комплекс позволяет решать широкий класс задач нелокальной термоупругости в твердых телах произвольной формы. Программный комплекс с открытым исходным кодом дает возможность как модифицировать существующие, так и добавлять в дальнейшем новые программные модули. Разработанная иерархия оценок термоупругих характеристик композита дают возможность на этапе проектирования прогнозировать эффективные тепловые и термоупругие свойства структурно-чувствительных сред.

**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**:

…

Соискатель Соколов А.А. …на задаваемые ей в ходе заседания вопросы.

На заседании 17 декабря 2024 г. **диссертационный совет принял решение**…

При проведении тайного голосования **диссертационный совет** в количестве … человек, из них … докторов наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, участвовавших в заседании, из …. человек, входящих в состав совета, **проголосовал: за** – …, **против** – …, **недействительных бюллетеней** ….

Председатель

диссертационного совета, Кувыркин

д.т.н., профессор Георгий Николаевич

Учёный секретарь

диссертационного совета, Аттетков

к.т.н., доцент Александр Владимирович

«17» декабря 2024 г.