

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.323.01, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ЛИПЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело №_____

решение диссертационного совета от 10.04.2024 г. №36

О присуждении Жукову Петру Игоревичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Моделирование процесса нестационарного нагрева твердого тела с неявной адаптацией к его теплофизическим параметрам» по специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите 22.01.2024 г. (протокол заседания № 32) диссертационным советом 24.2.323.01, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 398055, г. Липецк, ул. Московская, 30, приказ о создании диссертационного совета №546/нк от 01 июня 2019 года.

Соискатель Жуков Пётр Игоревич, 24 мая 1996 года рождения, в 2020 году окончил магистратуру ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» по направлению «Автоматизация технологических процессов и производств» с отличием. Работает в должности ассистента кафедры «Автоматизированные и информационные системы управления им. Ю.И. Ерёменко» Старооскольского технологического института им. А.А. Угарова (филиала) ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Проходит обучение в аспирантуре очной формы обучения в ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС».

Диссертация выполнена на кафедре «Автоматизированные и информационные системы управления им. Ю.И. Еременко» Старооскольского технологического института им. А.А. Угарова (филиала) ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент Глущенко Антон Игоревич, ФГБУН «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук», ведущий научный сотрудник лаборатории «Адаптивных и робастных систем им. Я.З. Цыпкина».

Официальные оппоненты:

Затонский Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор, Березниковский филиал ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (г. Березники), кафедра «Автоматизации технологических процессов», заведующий кафедрой;

Канарейкин Александр Иванович, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе» (г. Москва), кафедра общей физики, доцент кафедры; дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (г. Тамбов) в своем положительном отзыве, подписанным Громовым Юрием Юрьевичем, доктором технических наук, профессором, директором института автоматики и информационных технологий и Балабановым Павлом Владимировичем, доктором технических наук, доцентом, заведующим кафедрой «Мехатроника и технологические измерения» и утвержденным Муромцевым Дмитрием Юрьевичем, доктором технических наук, профессором, проректором по научной работе, указала, что диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная

задача упрощения процесса адаптации классической математической модели нестационарной теплопроводности к специфике отдельных технологических объектов или процессов при помощи численных экспериментов и компьютерного моделирования, и соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842 (с изменениями).

Соискатель имеет 25 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 17 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 8 работ (4 – ВАК РФ, 4 – Scopus / Web of Science), 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 5 публикаций – в трудах всероссийских и международных конференциях.

Наиболее значительные научные работы по теме диссертации:

1. Жуков, П. И. Неявная адаптация сеточной модели нестационарной теплопроводности к нагреваемому веществу / П.И. Жуков, А.И. Глущенко, А.В. Фомин // Управление большими системами. – 2022. – № 100. – С. 78-106.
2. Жуков, П. И. Алгоритмическая устойчивость и сложность процесса неявной адаптации сеточной модели нестационарной теплопроводности к нагреваемому веществу / П.И. Жуков, А.И. Глущенко, А.В. Фомин // Управление большими системами. – 2023. – № 101. – С. 39-63.
3. Жуков, П. И. Сравнение модели конечных разностей и машинного обучения для задачи прогнозирования температуры заготовки, нагреваемой в проходной печи / П.И. Жуков, А.И. Глущенко, А.В. Фомин // Управление большими системами. – 2022. – № 95. – С. 79-100.
4. Жуков, П. И. Модель для прогнозирования температуры заготовки по ретроспекции ее нагрева на основе бустинга структуры «случайный лес» / П.И. Жуков, А.И. Глущенко, А.В. Фомин // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. – 2020. – Т. 18. – № 4. – С. 11-27.

5. Zhukov P. Algorithmic Stability of Implicit Adaptation Process of Transient Thermal Conductivity Grid Model to Heated Material / P. Zhukov, A. Glushchenko, A. Fomin //2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). – IEEE, 2023. – P. 738-743.

6. Zhukov P. On Adaptation of Third Kind Boundary Conditions for Grid Models of Nonstationary Heat Exchange/ P. Zhukov, A. Glushchenko, A. Fomin // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2022. – P. 1009-1013.

7. Zhukov P. Comparison of finite-difference and data-based models of temperature transfer process in heating furnaces for cast billet temperature prediction / P. Zhukov, A. Glushchenko, A. Fomin // International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency. – IEEE, 2021. – P. 811-816.

8. Zhukov P. Comparison of Training Efficiency of Transient Heat Conduction Mesh Model Using Different Objective Functions and Optimizers / P. Zhukov, A. Glushchenko, A. Fomin // International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency. – IEEE, 2022. – P. 301-305.

В работах, написанных в соавторстве и приведенных в автореферате, лично соискателем получены следующие результаты: [1] – предложенная в диссертации математическая модель и численный метод нестационарной теплопроводности с неявной адаптацией; в [2] – анализ алгоритмической сложности и вывод критериев устойчивости предложенного численного метода; в [3-4] – математическая модель нестационарной теплопроводности и статистические модели аппроксимации уравнения нестационарной теплопроводности для частного случая нагрева стали; в [5-8] – математическая формализация и синтез предлагаемых моделей, подготовка данных, апробация, численные эксперименты; в [9-12] – разработка архитектуры и программного кода лицензируемого программного обеспечения; в [13-17] – постановка задачи, разработка решений и синтез математических моделей.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Воронина А.А., д.ф-м.н., профессора, заведующего кафедрой фундаментальной информатики и оптимального управления ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет» (г. Волгоград). Замечания: 1) во второй главе указан только один класс алгоритмической сложности модели групповой адаптации. Обычно сложность указывают в «лучшем», «худшем» и «усредненном» случаях. Из текста работы неясно, о каком случае идет речь; 2) для уравнений (19) и (20) без дополнительных пояснений, которые есть в тексте основной работы и отсутствуют в автореферате, понять логический переход от (19) к (20) не представляется возможным.

2. Бирюкова А.Б., д.т.н., профессора, заведующего кафедрой технической теплофизики ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк). Замечания: 1) не хватает краткого пояснения, почему при переходе от уравнения (1) к уравнению (2) исчезла функция внутренних источников тепла; 2) на рис.1 из контекста понятно, что ортогональные сети имеют одинаковый шаг, однако из самого рисунка это не следует.

3. Грязиной Е.Н., доктора компьютерных наук (степень присуждена НИУ «Высшая школа экономики»), старшего преподавателя Сколковского института науки и технологий (г. Москва). Замечания: 1) из текста автореферата не понятно, сохраниться ли применимость предложенного подхода, если функции g_1 и g_2 определить на основе других граничных условий.

4. Шашкина А.И., д.ф-м.н., профессора, заведующего кафедрой математического и прикладного анализа ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» (г. Воронеж). Замечания: 1) стоило, возможно, привести вместо UML-диаграммы сценария использования классовую структуру, поскольку дальше по тексту упоминается модульная архитектура; 2) к сожалению,

в тексте автореферата лишь упоминаются отдельные алгоритмы программного комплекса, но не приводятся явно.

5. Митина А.С., к.т.н., главного специалиста отдела автоматизации ООО «Городской институт проектирования металлургических заводов» (г. Старый Оскол). Замечания: 1) в автореферате не отражено от чего зависит эмпирический коэффициент k в функциях коррекции (14). От корректируемого параметра, входных данных или условий самой задачи?

6. Польщикова К.А., д.т.н., доцента, профессора кафедры информационных и робототехнических систем ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (г. Белгород). Замечания: 1) на защиту выносится, помимо прочего, также комплекс программ, отличающийся от имеющихся модульной структурой и применением «чистой» архитектуры кода, однако в тексте автореферата этому практически неделено внимание.

Все отзывы положительные. На замечания даны подробные ответы.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается широкой известностью своими достижениями в данной отрасли науки, наличием публикаций в соответствующей сфере исследований и способностью определить научную и практическую ценность диссертации, а также их согласием.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

предложен численный метод неявной адаптации конечно-разностной модели нестационарной теплопроводности с граничными условиями III-го рода на основе модификации метода градиентного спуска, заменяющий обратную коэффициентную задачу теплопроводности на смежную вариационную задачу по входной статистке и позволяющий повысить точность подобных моделей при решении научно-технических задач по сравнению с классическими моделями с групповой «явной» адаптацией;

предложена математическая модель нестационарной теплопроводности в двумерной постановке для граничных условий III-го рода, в которой изменение

теплофизических параметров нагреваемого твердого тела и коэффициента теплообмена на его границе восстанавливается неявно из статистических данных о процессе нагрева, сохраняя при этом интерпретируемую структуру модели и позволяя повысить эффективность применения такого рода моделей для ситуаций нагрева групп материалов со схожими теплофизическими характеристиками;

предложен универсальный проблемно-ориентированный программный комплекс моделирования процесса нестационарного теплопереноса с граничными условиями III-го рода, включающий в себя алгоритмическую реализацию упомянутого численного метода неявной адаптации по статистическим данным и основанный на модульной гексагональной архитектуре объектно-ориентированного программирования (ООП);

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана с помощью численных экспериментов возможность восстановления динамики изменения теплофизических параметров нагреваемого твердого тела и коэффициентов теплообмена на его границах в неявном виде на основе статистических данных о процессе нагрева без явного указания материала этого тела в ситуациях, соответствующих граничным условиям III-го рода;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использован математический аппарат численного конечно-разностного моделирования нестационарной теплопроводности; численный метод стохастического градиентного спуска; базовые уравнения математической статистики и регрессионного анализа; методы физического и компьютерного моделирования; планирования численных экспериментов;

раскрыты проблемы применения существующих методов коэффициентной адаптации численных моделей нестационарной теплопроводности для сложных условий нагрева (высокотемпературный нагрев твердых тел из группы схожих материалов);

проведена модернизация существующей численной математической модели нестационарной теплопроводности, полученной методом конечных разностей для

граничных условий III-го рода, и метода стохастического градиентного спуска с целью обеспечить упомянутую модель возможностью проводить коэффициентную адаптацию неявно на основе статистических данных о тепловом процессе.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработано и принято к использованию в системе оптимизации расхода топлива печей нагрева АО «Оскольский электрометаллургический комбинат им. А.А. Угарова» (ОЭМК) программное обеспечение, полученное на основе предложенных математических моделей и численных методов, реализованных в виде проблемно-ориентированного комплекса программ;

определенна сфера практического применения – предприятия, реализующие технологические процессы, предполагающие высокотемпературную обработку твердых тел различной формы в тепловых агрегатах радиационно-конвективного нагрева.

создана система практических рекомендаций по выбору параметров предложенной численной модели нестационарной теплопроводности с неявной адаптацией, выраженная в виде полученных ограничений, обеспечивающих алгоритмическую устойчивость разработанного численного метода.

результаты исследования используются в учебном процессе Старооскольского технологического института им. А.А. Угарова (филиала) ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» для дисциплин «Математическое моделирование» и «Программирование на языках высокого уровня».

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ результаты получены на статистических данных с действующего теплового объекта (методической проходной печи нагрева заготовок перед прокатом), применяемого на АО «Оскольский электрометаллургический комбинат им. А.А. Угарова» (ОЭМК), показана соответствие теоретических расчетов с экспериментальными данными, показана воспроизводимость результатов исследования в различных условиях;

теория построена на известных проверяемых фактах, посвящена вопросам математического моделирования нестационарной теплопроводности в двумерном случае для высокотемпературного нагрева и проблемам коэффициентной адаптации таких моделей и согласуется с ранее опубликованными работами по теме диссертации;

идея базируется на анализе практик коэффициентной адаптации математических моделей нестационарной теплопроводности при помощи решения обратных задач теплопроводности и практик замены численного решения модели нестационарной теплопроводности на его аппроксимацию с помощью инструментария регрессионного анализа;

использовано сравнение предложенного в диссертации решения с другими способами моделирования нестационарной теплопроводности, в том числе и неклассическими, связанными с аппроксимацией одноименного дифференциального уравнения при помощи инструментария регрессионного анализа на данных, полученных с действующего теплового объекта, применяемого на АО «Оскольский электрометаллургический комбинат им. А.А. Угарова»;

установлено качественное совпадение авторских результатов с известными литературными данными, представленными в независимых источниках, что говорит об достоверности полученных результатов;

использованы современные методики сбора и обработки исходных данных, представительные выборочные совокупности с обоснованием объектов наблюдения и измерения при сборе статистики из автоматизированной системы управления технологическим процессом действующей многозонной методической пламенной нагревательной печи.

Личный вклад соискателя состоит в:

непосредственном участии во всех этапах процесса диссертационного исследования, в том числе: разработка предложенных математической модели и численного метода неявной адаптации; разработка проблемно-ориентированного программного комплекса; проведение численных экспериментов; обобщение и

формулировка основных положений и выводов; подготовка публикаций по теме диссертационного исследования.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

Соискатель Жуков П.И. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию значимости проведенных исследований и полученных результатов, а также отметил, что высказанные пожелания будут учтены в дальнейшей работе.

На заседании 10 апреля 2024 года диссертационный совет принял решение за новые теоретические и практические разработки в области моделирования процесса нестационарного нагрева твердого тела с нелинейными граничными условиями, позволяющие повысить эффективность применения такого рода моделей для ситуаций нагрева групп материалов со схожими теплофизическими характеристиками и имеющие существенное значение для промышленных предприятий, присудить Жукову П.И. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 13 человек, из них 6 докторов наук по научной специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», из 17 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали:

за – 13, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель

диссертации

Ученый секретарь

диссертации

«10» апреля 2024 г.

Погодаев Анатолий Кирьянович

Седых Ирина Александровна