

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по научной работе  
ФГБОУ «ТГТУ»,

д.т.н., профессор  мцев

« 26 »  2024 г.

### **Отзыв ведущей организации**

на диссертацию Жукова Петра Игоревича «Моделирование процесса нестационарного нагрева твердого тела с неявной адаптацией к его теплофизическим параметрам», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности  
1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)

#### **1. Актуальность темы диссертационного исследования**

На сегодняшний день активно развиваются средства промышленной цифровизации (Индустрия 4.0) с целью повышения энергоэффективности отдельных технологических объектов или оптимизации целых производственных линий. В основе предлагаемых подходов лежит математическое моделирование тех или иных физических процессов, протекающих в технологических объектах. Анализ попыток практической реализации таких систем цифровизации показал, что технологические и технические ограничения отдельных производств сильно сказываются на применимости большинства «классических» математических моделей. В частности, это касается применимости тепловых моделей, например таких, с помощью которых моделируют нагрев твердых тел в печах промышленного назначения. Такие модели на практике могут быть частью программ-советчиков или элементами оптимизирующих надсистем управления, однако

их применение требует нетривиальных процедур адаптации, что обуславливает актуальность исследований, направленных на упрощение этих процедур.

Упомянутая проблема особенно актуальна в нестандартных приложениях «классических» тепловых моделей, например, когда моделируется нагрев в среде высоких температур одной моделью для группы схожих по теплофизической конфигурации твердых тел. Данный факт определяет **актуальность** диссертационного исследования Жукова П.И., предлагающего численный метод и математическую модель неявной адаптации модели нестационарной теплопроводности на основе статистических данных о тепловом процессе.

## **2. Краткое содержание диссертационной работы**

Представленная диссертационная работа изложена на 151 странице машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 112 источников и двух приложений.

**Во введении** отражена и обоснована актуальность работы, сформулирована цель и задачи, а также научная новизна и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приводится описание «классического» подхода к моделированию нагрева твердых тел в среде высоких температур. Здесь рассматриваются дифференциальные уравнения стационарной и нестационарной теплопроводности в общем виде, а также анализируются некоторые аналитические решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности для граничных условий III-го рода. На основе анализа делается вывод о целесообразности численного моделирования, и рассматриваются основные методы построения численных моделей нестационарной теплопроводности с упомянутыми граничными условиями.

**Вторая глава** работы посвящена проблеме явной (т.е. внешними моделями) адаптации численной конечно-разностной модели нестационарной теплопроводности к теплофизическим параметрам нагреваемого твердого тела

и коэффициенту теплообмена на его границе, определенному в граничных условиях. Данная проблема сводится к определению численных законов изменения таких параметров, как теплопроводность, теплоемкость, плотность и коэффициент теплообмена от температуры нагреваемого твердого тела. Особенно остро эта проблема стоит для моделей, которые призваны описывать некий «усредненный» материал твердого тела. В главе рассматривается несколько способов определения этих численных законов, отдельно выделяя при этом те, что основаны на применении статистических инструментов, ведущих к так называемой «неявной» адаптации. В выводах по данной главе заключается, что, несмотря на множественные успешные реализации таких статистических моделей с неявной адаптацией, они обладают сложной и неинтерпретируемой внутренней структурой.

**В третьей главе** описывается предложенная математическая модель на основе конечно-разностной модели нестационарной теплопроводности с механизмом неявной адаптации. Приведен предлагаемый численный метод, который позволяет более интерпретируемой по своей структуре модели восстанавливать упомянутые во второй главе законы изменения теплофизических параметров неявно, используя данные о процессе нагрева, описываемом граничными условиям III-го рода. Проанализирована сложность и устойчивость упомянутого выше численного метода, на основе чего делается вывод о его эффективности по отношению к «классическим» методам «групповой» явной адаптации.

**Четвертая глава** посвящена апробации предложенной в третьей главе математической модели и численного метода на частном, но весьма распространенном, случае нагрева твердых тел из сталей в среде высоких температур при помощи проходных многозонных печей. Рассматривается сравнение предложенной модели и численного метода с «классическими» моделями «групповой явной» адаптации и моделями на основе статистических инструментов. Приведена архитектура кода и алгоритмов разработанного проблемно-ориентированного комплекса программ.

**В заключении** сформулированы выводы по диссертационной работе.

**В приложении А** продемонстрированы алгоритмы проблемно-ориентированного комплекса программ, архитектура которого изложена в заключительной части четвертой главы.

**В приложении Б** приведены акт об использовании результатов диссертационного исследования в образовательном процессе Старооскольского технологического института им. А.А. Угарова (филиала) ФГАОУ ВО «НИТУ МИСИС», а так же акт об использовании результатов диссертационного исследования на АО Оскольский электрометаллургический комбинат им. А.А. Угарова «ОЭМК».

В работе приводятся 36 рисунков, 20 таблиц и 138 формул. Автореферат в достаточной степени соотносится с текстом диссертации.

### **3. Научная и практическая значимость сформулированных результатов и выводов диссертационного исследования**

В работе предложено решение задачи неявной адаптации численной модели нестационарной теплопроводности к теплофизическим параметрам нагреваемого твердого тела и коэффициента теплообмена на его границах. В диссертационном исследовании следующие сформулированные результаты обладают **научной новизной**:

1. Описанная в п.3.1 текста диссертации математическая модель нестационарной теплопроводности, полученная на основе конечно-разностной модели с покоординатным расщеплением и обладающая неявной адаптацией к теплофизическим параметрам нагреваемого твердого тела и коэффициента теплообмена на его границах;

2. Описанный в п.3.2 и п.3.4 текста диссертации численный метод на основе модифицированного метода градиентного спуска, позволяющий восстанавливать температурные зависимости теплофизических параметров нагреваемого твердого тела и коэффициента теплообмена на его границах неявно из статистических данных о тепловом процессе, а также детально

рассмотренный в п.3.3 анализ алгоритмической сложности и устойчивости предложенного численного метода на основе модифицированного метода градиентного спуска;

3. Предложенные в п.4.4 текста диссертации структуры проблемно-ориентированных программных комплексов на основе «чистой» гексагональной объектно-ориентированной архитектуры с возможностью модульного масштабирования.

**Практическая значимость** полученной математической модели и численного метода подтверждается актом об её использовании в системе оптимизации расхода топлива печей нагрева АО Оскольский электрометаллургический комбинат им. А.А. Угарова (ОЭМК).

#### **4. Обоснованность и достоверность основных научных результатов диссертационного исследования**

Основные результаты диссертационного исследования изложены в 17 научных работах, опубликованных в научных журналах и материалах конференций, среди которых 4 работы, опубликованные в журналах из Перечня ВАК, рекомендуемых для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук; 4 – в изданиях, индексируемых в наукометрической базе Scopus, и 5 – в материалах всероссийских научных конференций.

Достоверность полученных теоретических результатов и их обоснованность подтверждается многократной апробацией на научных семинарах и конференциях всероссийского и международного характера. Результаты исследования обсуждались на секции предзащит на XIX-й Всероссийской научной конференции «Управление большими системами».

#### **5. Соответствие заявленной специальности**

Представленная диссертационная работа выполнена в рамках специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и

комплексы программ. Выбранная тема исследования и решаемые задачи соответствуют заявленному паспорту специальности по следующим пунктам:

- п.2 «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий»;
- п.3 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента»;
- п.8 «Комплексное исследование научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента».

## **6. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Предложенный в работе подход применим для решения задач, связанных с моделированием нестационарных тепловых процессов численным конечно-разностным методом. Примером таких задач, например, в металлургии и машиностроении являются: 1) моделирование нагрева поверхности твердого тела из сталей различных марок при непрерывном потоковом технологическом процессе; 2) моделирование распределения температуры в замкнутой области теплового агрегата при нестационарных источниках тепла; 3) моделирование нагрева составных частей тепловых и горелочных устройств с целью изучения влияния теплового поля на эффективность их работы. Адекватность упомянутых выше моделей напрямую влияет на качество получаемого металла/изделий. Также предложенный автором подход может быть применен для решения обратных задач идентификации параметров. Зафиксировав теплофизические параметры нагреваемого тела, можно дискретно восстановить значение коэффициента теплообмена на границе с ним, тем самым идентифицировав конвективную составляющую теплового процесса. Кроме того, полученные результаты могут быть применены в учебном процессе высших учебных заведений по дисциплинам соответствующего профиля.

## 7. Замечания и характеристика работы

К содержательной части диссертационного исследования имеются следующие замечания:

1. В п.4.4 рассматривается структура комплекса программ, разработанных для проведения численных экспериментов, в том числе, апробации предлагаемых в исследовании решений. Почему было решено разрабатывать собственный программный комплекс, а не использовать доработанные модули для уже существующих средств численного моделирования «Q-Form или ANSYS»?

2. В п.3.3 по факту формулирования условий устойчивости имеются два параметра при определении области смещения  $\omega$  (уравнение 117). Что имеется в виду под параметром программного ограничения хранения вещественных чисел? Его нужно определять для конкретной ЭВМ или для конкретного языка программирования?

3. Там же, в п.3.3. приводится алгоритмическое решение проблемы устойчивости и предлагается несколько функций, включая некоторую функцию «new(•)». Учитывалась ли сложность этого решения при дальнейшем анализе алгоритмической сложности? Если да, то каков результат?

Сделанные замечания **не носят принципиального характера** и не влияют на общую **положительную оценку работы**.

## 8. Общее заключение

На основании вышеизложенного можно заключить, что диссертация Жукова Петра Игоревича «Моделирование процесса нестационарного нагрева твердого тела с неявной адаптацией к его теплофизическим параметрам» **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.

Диссертационное исследование соответствует требованиям п.9-п.14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013г. №842 (с изменениями), а её автор Жуков Петр Игоревич заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки).

Отзыв обсуждался на заседании кафедры «Мехатроника и технологические измерения» протокол № 4 от «22» 02 2024 г.

Отзыв подготовлен доктором технических наук, профессором Громым Юрием Юрьевичем (научная специальность 05.13.06 – Автоматизация и управления технологическими процессами и производствами (по отраслям)).

Заведующий кафедрой «Мехатроника и технологические измерения» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», д.т.н., доцент  
\_\_\_\_\_ Павел Владимирович Балабанов  
«26» 02 2024 г.

Директор института автоматизации и информационных технологий ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», д.т.н, профессор  
\_\_\_\_\_ Юрий Юрьевич Громов  
«26» 02 2024 г.

 ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ  
И СЕКРЕТАРЬ ТГТУ  
\_\_\_\_\_ Г.В. Мозгова  
02 2024 г.