

Отзыв

официального оппонента Канарейкина Александра Ивановича на диссертационную работу 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)

I. Актуальность темы диссертации

Одним из частных результатов, полученных в результате попыток реализации современных концепций цифровизации для тепловых объектов и процессов, является вывод о необходимости адаптации большинства математических тепловых моделей, которые сегодня уже принято называть «классическими». Такого рода модели обладают достаточно высоким уровнем абстракции описываемых тепловых процессов, что без дополнительных процедур адаптации не позволяет адекватно применять их для описания реальных процессов нагрева или остывания. Сложность процедур адаптации тепловых моделей напрямую зависит от сложности того или иного описываемого процесса или явления. Нередко при практическом применении таких моделей возникает ситуация, когда процедуры явной адаптации затруднены или невозможны по ряду технологических причин. В таком случае актуальной является разработка неявных способов адаптации. Ввиду данного факта тематика работы П.И. Жукова, направленной на разработку модификации «классической» конечно-разностной модели с целью внедрить в неё механизм неявной адаптации, является **актуальной**.

II. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Достоверность научных результатов подтверждается корректным использованием математического аппарата, методов математического

моделирования, численных методов, а также проведенными в достаточном объеме вычислительными экспериментами и успешной апробацией выносимых на защиту моделей и методов на наиболее распространенном случае нестационарного нагрева твердых тел из стали в промышленных проходных печах, а также сравнительным анализом полученных результатов с экспериментальными данными.

Полученные результаты исследования были опубликованы в 17 научных изданиях, из которых 4 – в изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. На заявленные программные комплексы были получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

III. Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

В диссертационном исследовании следующие результаты и выводы обладают элементами научной новизны:

- Предложенный численный метод на основе модификации метода градиентного спуска, который позволяет восстанавливать динамику изменения теплофизических параметров нагреваемого твердого тела и коэффициентов теплообмена на его границах неявно на основе статистических сведений о тепловом процессе, адекватном граничным условиям III-го рода;
- Предложенная математическая модель на основе модификации конечно-разностной модели нестационарной теплопроводности в двумерной постановке, для которой определен механизм неявной адаптации к теплофизическим параметрам нагреваемого твердого тела и коэффициентам теплообмена на границе при помощи упомянутого выше численного метода;
- Предложенные алгоритмы, программная объектно-ориентированная модульная архитектура и сценарии взаимодействия с комплексом программ, позволяющим моделировать нестационарный нагрев в

твердом теле при помощи как подхода явной адаптации, так и предложенных математической модели и численного метода неявной адаптации.

IV. Значимость для науки и практики полученных автором результатов

Полученные теоретические результаты, сформулированные в тексте диссертационного исследования, вносят вклад в развитие методов неявной адаптации «классических» тепловых моделей на основе дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности.

Практическая значимость сформулированных результатов диссертационного исследования характеризуется следующими положениями:

- Детально изучена устойчивость и сложность предложенного численного метода. На практике это позволяет гарантировать работоспособность программного комплекса, в основу которого положен упомянутый численный метод;
- Описана архитектура кода и приведены алгоритмы для построения проблемно-ориентированного программного комплекса, реализующего предложенные в диссертации математическую модель и численный метод. Что обеспечивает воспроизводимость предложенного решения.

С практической точки зрения предложенные математическая модель, численный метод и комплекс программ позволяют проводить математическое моделирование нагрева твердых тел в промышленных тепловых агрегатах в случае невозможности идентификации их теплофизических параметров, что может использоваться, например, в системах поддержки работы операторов этих агрегатов или в качестве предиктивных моделей систем оптимизации расхода топлива промышленных печей.

V. Содержание работы

Диссертационное исследование изложено в четырех главах основного текста. Список использованной литературы содержит 112 наименований, а полный текст работы представлен на 151-ой странице машинописного текста.

В первой главе рассматривается «классический» подход к моделированию теплопроводности в твердом теле в среде высоких температур. В рамках главы рассматриваются два дифференциальных уравнения: стационарной и нестационарной теплопроводности. Анализируются некоторые аналитические решения, приведенные для одномерного вида уравнения с граничными условиями III-го рода. В заключительной части главы рассматриваются «классические» способы численного моделирования на основе дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности с граничными условиями III-го рода.

Во второй главе рассматривается детально проблема адаптации моделей нестационарной теплопроводности к нагреваемому телу и условиям теплообмена на границе. При высокотемпературном нагреве теплофизические параметры твердого тела должны представлять собой функции от температуры. Данная проблема рассматривается для наиболее актуального на сегодняшний день случая «групповой адаптации», когда одна модель нестационарной теплопроводности призвана описывать нагрев твердых тел из материалов, схожих по своим теплофизическим параметрам. Рассматриваются практические аспекты такого рода адаптации на примере твердых тел из схожих по конфигурации сталей и выводятся его основные недостатки. Иллюстрируется связанная с уже упомянутой проблемой адаптации коэффициента теплообмена для граничных условий III-го рода при попытках «групповой адаптации» к некоторому «усредненному материалу». В заключении главы рассматривается альтернативный класс моделей, описывающих нагрев твердых тел. Такие модели аппроксимируют уравнение нестационарной теплопроводности, а не решают его численно. Это приводит к тому, что подобные модели имеют возможность решать упомянутую проблему адаптации неявно, но обладают сложной неинтерпретируемой внутренней структурой.

В третьей главе приводится описание предлагаемой математической модели нестационарной теплопроводности с неявной адаптацией к

теплофизическим параметрам нагреваемого твердого тела и условиям теплообмена на границе. В главе детально рассматривается предлагаемый численный метод, позволяющий предложенной модели восстанавливать динамику изменения заявленных параметров неявно из статистических данных о процессе нагрева, адекватном граничным условиям III-го рода. Исследуются вопросы алгоритмической сложности и устойчивости численного метода.

В четвертой главе рассматривается частный случай нестационарной теплопроводности в твердых телах из стали, нагреваемых в методических проходных печах. Иллюстрируется апробация предложенной в третьей главе математической модели и численного метода на упомянутом частном случае. В заключительной части главы рассматривается архитектура кода и алгоритмов разработанного проблемно-ориентированного комплекса программ.

VI. Основные замечания и выводы по работе

На основании текста и автореферата диссертационной работы П.И. Жукова выделены следующие замечания:

1. В п.1.2 функция внутреннего источника тепла сразу исключается из рассмотрения. Почему? Какие предпосылки у данного допущения?
2. Основная идея замены переменных на безразмерные аналоги привела к уменьшению количество степеней свободы модели. Почему три теплофизических параметры были заменены на два безразмерных коэффициента, а не на три, или, положим, один?
3. В конце п.3.3 приводится «алгоритмическое решение» на основе некоторой функции «*new(•)*» однако далее нигде в работе не приводится алгоритм этой функции в явном виде или в нотации блок-схем;

Стоит отметить, что несмотря на указанные выше замечания, представленное диссертационное исследование **является целостным и актуальным**. Сделанные замечания не снижают научную или практическую значимость работы соискателя. Тема работы соответствует паспорту специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и

комплексы программ, а выносимые положения на защиту соответствуют заявленным 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» и п.8 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента» данного паспорта. Автореферат в полной мере отражает содержательную часть диссертационного исследования.

VII. Конкретные предложения и рекомендации по использованию результатов диссертационного исследования

Предложенная математическая модель, численный метод и комплекс программ могут быть использованы при моделировании нагрева стальных заготовок в промышленных печах проходного типа, где одновременно нагреваются группы схожих по теплофизическим параметрам твердых тел и при этом такие группы слишком велики, чтобы их можно было обобщить явно. Примером такого процесса можно считать нагрев в методических печах стальных заготовок из углеродистых сталей перед горячим прокатом.

VIII. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Таким образом, диссертация Жукова П.И. на соискание ученой степени кандидата наук является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи неявной адаптации численной модели нестационарной теплопроводности к теплофизическим параметрам нагреваемого твердого тела и условиям теплообмена на его границе, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний.

Считаю, что диссертационная работа на тему «Моделирование процесса нестационарного нагрева твердого тела с неявной адаптацией к его теплофизическим параметрам» удовлетворяет требованиям п.п.9-14 «Положение о порядке присуждения ученых степеней (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842)», а её автор П.И. Жуков заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Даю свое согласие на автоматизированную обработку персональных данных, приведенных в этом документе.

Кандидат технических наук (01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника), доцент кафедры общей физики федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»

 Канарейкин Александр Иванович

« 20 » сентября 2024г.

Контактные данные:

117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, дом 23; +7(915)161-99-59,
kanareykins@mail.ru

Подпись Канарейкина А.И. заверяю,
ректор федерального государственного образовательного учреждения
высшего образования «Российский государственный геологоразведочный
университет имени Серго Орджоникидзе»

 Панов Юрий Петрович

« 20 » сентября 2024г.