

На правах рукописи

Жуков Павел Владимирович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
ОХЛАЖДАЕМЫХ ПОЛЫХ ЦИЛИНДРОВ С НЕСТАЦИОНАРНОЙ
ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКОЙ**

Специальности: 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2013

Работа выполнена на кафедре «Прикладная математика» ФГБОУ ВПО
«Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный руководитель: Мизонов Вадим Евгеньевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Бобков Сергей Петрович
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный
химико-технологический университет»,
заведующий кафедрой «Информационные
технологии»

Елин Николай Николаевич
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный
политехнический университет», заведующий
кафедрой «Гидравлика, теплотехника
и инженерные сети»

Ведущая организация: Ярославский государственный технический
университет, г. Ярославль

Защита состоится «18» октября 2013 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.03 при ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим присылать по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38–57–12, 26–98–61, факс: (4932) 38–57–01. E-mail: uch_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Автореферат размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан «16» сентября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Шульпин
Андрей Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из проблем технологии непрерывной разливки стали является преждевременный выход из строя элементов роликового конвейера, служащего для транспортировки раскаленного металла, и связанная с этим недостаточная надежность данного оборудования. Эта транспортная система, называемая также рольгангом, состоит из вращающихся вокруг горизонтальной оси роликов. По внешней образующей данных роликов поступательно перемещается раскаленный металлический слиток (сляб), а во внутренний канал ролика для его охлаждения подается вода. Ролики работают в тяжелых условиях, поскольку находятся в зоне повышенных температур и испытывают высокие механические нагрузки, связанные с поддержкой сляба. В области контакта ролика со слябом происходит разогрев его внешней поверхности, что приводит к возникновению значительных термических напряжений. Особенно большие нагрузки возникают в роликах после частичного затвердевания сляба («захолаживания») при временном, как правило, аварийном останове технологической линии. Совокупность термических и механических напряжений, которые носят циклический характер, приводят к образованию трещин и преждевременному выходу роликов из строя часто до выработки своих паспортных ресурсов.

Моделирование и расчет теплового и напряженного состояния роликов и разработка на его основе режимных и конструктивных мероприятий, увеличивающих надежность и продлевающих срок безаварийной эксплуатации оборудования, является актуальной научной и технической задачей.

С научной точки зрения актуальность работы обусловливается необходимостью моделирования теплового и напряженного состояния охлаждаемых полых цилиндров с нестационарной тепловой нагрузкой, разработки методов расчета и программных комплексов для их реализации.

Технологическая актуальность работы обусловливается необходимостью разработки конструктивных и режимных мероприятий, обеспечивающих надежное и безаварийное функционирование рольганга.

Решение перечисленных задач позволяет на стадии проектирования проанализировать эффективность принимаемых решений и предвидеть результаты их реализации, что представляет несомненный интерес для целого ряда отраслей промышленности.

Актуальность работы подтверждается также ее выполнением в рамках Федеральной целевой программы «Интеграция» (2.1–А118 Математическое моделирование ресурсосберегающих и экологически безопасных технологий) и договоров о международном научно-техническом сотрудничестве с Ченстоховским университетом (Польша).

Цель работы. Повышение достоверности расчетного прогнозирования теплового и напряженного состояния толстостенных цилиндров (в частности, роликов рольгангов) при нестационарных тепловых нагрузках путем разработки математических моделей, численных методов и программных комплексов для их расчета.

Задачи исследования:

1. Разработка ячеечной математической модели процесса теплопроводности во вращающемся толстостенном цилиндре при нестационарных тепловых нагрузках, численных методов ее реализации и вычислительных комплексов для проведения вычислительных экспериментов по исследованию влияния режимных и конструктивных факторов на тепловое состояние роликов рольганга.

2. Разработка модели формирования термических напряжений в толстостенном цилиндре и методики оценки его работоспособности на примере роликов рольганга при различных режимах функционирования системы их охлаждения.

3. Проведение численных экспериментов и разработка на их основе конструктивных и режимных мероприятий для повышения эффективности и надежности работы роликов машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ).

4. Практическая реализация результатов работы путем внедрения в проектные работы и непосредственно в производство усовершенствованных методов расчета и средств их компьютерной поддержки для совершенствования технологического оборудования на примере теплообмена в роликах машин непрерывного литья заготовок и повышения надежности их функционирования.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности: *в части формулы специальности 05.13.18*: «применение математического моделирования, численных методов и комплексов программ для решения научных и технических, фундаментальных и прикладных проблем»; *в части области исследования специальности 05.13.18* – пункту 1: «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений, перечисленных в формуле специальности»; пункту 3: «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий»; пункту 4: «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно–ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента»; пункту 5: «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента».

Методы исследования. Поставленные задачи решались с использованием математического аппарата теории Марковских цепей, ячейной методологии, теории теплопроводности, теории термоупругости.

Научная новизна.

1. Разработана математическая модель теплового состояния охлаждаемых полых цилиндров с нестационарной тепловой нагрузкой, вызванной импульсным подводом тепловой энергии по внешней образующей и постоянным отводом тепловой энергии от внешней и внутренней поверхностей толстостенного цилиндра.

2. Разработан модифицированный матричный метод решения задачи нестационарной теплопроводности, алгоритм и программа для его компьютерной реализации при различной размерности модели объекта и выбранных краевых условиях.

3. Предложена методика оценки термических напряжений в ролике рольганга при заданном температурном поле и импульсном подводе тепловой энергии и выявлено влияние внутреннего охлаждения на его термонапряженное состояние.

Практическая ценность результатов.

1. Разработан программный пакет для расчета процесса теплопроводности во вращающемся цилиндре при импульсном подводе теплоты, защищенный свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ (№2012611546 от 10 февраля 2012 года).

2. Разработанная математическая модель и ее программно-алгоритмическое обеспечение являются основой достоверного расчета теплового и термонапряженного состояния роликов рольгангов при их проектировании и модернизации.

3. Результаты работы нашли практическое применение при выполнении научно-исследовательских проектов в Ченстоховском университете (Польша), а также внедрены в конвертерном производстве ОАО «Северсталь».

Достоверность полученных результатов подтверждается совпадением результатов расчета и фактических показателей работы оборудования; сопоставлением полученных результатов с опубликованными результатами исследований других авторов.

Обоснованность полученных результатов подтверждается использованием апробированных методов математического моделирования.

Сведения о внедрении результатов работы.

Разработан программный пакет для расчета процесса теплопроводности во вращающемся цилиндре при импульсном подводе теплоты, защищенный свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ. Результаты работы нашли практическое применение при выполнении научно-исследовательских проектов в Ченстоховском университете (Польша), а также внедрены в конвертерном производстве ОАО «Северсталь».

Автор защищает:

– ячеичную математическую модель теплового состояния толстостенного вращающегося цилиндра при импульсном подводе тепловой энергии через внешнюю образующую и непрерывном отводе тепловой энергии через внешнюю и внутреннюю поверхность цилиндра;

– численный матричный метод решения задачи нестационарной теплопроводности и алгоритм его компьютерной реализации при различной размерности объекта моделирования и различных условиях на границе;

– математическую модель и методику оценки термонапряженного состояния цилиндра, позволяющую учитывать зависимость свойств материала ролика от его температуры;

– программный пакет, реализующий предложенный расчетный метод и алгоритм, защищенный свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ;

– результаты расчетного исследования термонапряженного состояния ролика, полученные с использованием разработанного программного пакета, и

практические рекомендации по совершенствованию процесса охлаждения роликов в конвертерном цехе ОАО «Северсталь».

Личное участие автора состоит в разработке математической модели теплового состояния вращающегося цилиндра при импульсном подводе тепловой энергии; разработке модифицированного матричного метода численного решения уравнения теплопроводности; проведении численных экспериментов с разработанной математической моделью; разработке алгоритмов и программ по расчету процессов теплопроводности; проведении численных исследований и разработке рекомендаций по повышению эффективности охлаждения роликов рольганга применительно к условиям непрерывной разливки стали ОАО «Северсталь» (г. Череповец Вологодской обл.).

Апробация работы. Основные результаты опубликованы и обсуждались на 12-ти конференциях, в том числе, девяти международных: Международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электротехнологии» XV, XVI, XVII Бенардосовские чтения (Иваново, 2009, 2011, 2013 г.); Международных конференциях «Математические методы в технике и технологиях ММТТ 22, 23, 24, 25, 26» (Псков, 2009; Саратов, 2010; Саратов, 2011; Волгоград, 2012, Нижний Новгород, 2013); IX Международной научной конференции «Теоретические основы энерго-ресурсосберегающих процессов, оборудования и экологически безопасных производств» (Иваново, 2010); V, VII Региональных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Энергия» (Иваново, 2010, 2012); Внутривузовской научно-технической конференции «Энергия инновации» (Иваново 2013).

Публикации. Материалы диссертации нашли отражение в 17 опубликованных работах, в том числе в 5 статьях в ведущих рецензируемых журналах и изданиях (по списку ВАК), 1 монографии, 1 свидетельстве о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения по работе, списка использованных источников из 105 наименований. Текст диссертации изложен на 141 стр. машинописного текста, содержит 50 рисунков, 5 таблиц и 1 приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи диссертации, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, основные положения выносимые на защиту, обоснована достоверность результатов и дана общая характеристика структуры работы.

В первой главе рассмотрена актуальность проблемы исследования теплового и напряженного состояния полых толстостенных цилиндров при нестационарном подводе тепловой энергии. Выполнен анализ литературных источников, посвященных исследованию теплового и напряженного состояния технологического оборудования, используемого в различных отраслях промышленности, который показал, что вопросам моделирования теплового и напряженного состояния цилиндров при нестационарном нагреве посвящено

большое число исследований ряда авторов: С.С. Кутателадзе, А.В. Лыкова, Л.В. Буланова, А.Д. Коваленко и др. При этом только частично решены вопросы моделирования теплового и напряженного состояния технологического оборудования в условиях нестационарной тепловой нагрузки, для определения оптимальных условий функционирования исследуемых агрегатов. На основе проведенного анализа сформулированы цель и задачи работы, решение которых необходимо для достижения поставленной цели.

Вторая глава посвящена разработке ячеечных математических моделей теплового состояния охлаждаемых толстостенных цилиндров с нестационарной тепловой нагрузкой. В качестве объекта исследования рассматривается ролик рольганга, эскиз которого представлен на рис. 1,а. Раскаленный сляб 1 поступательно движется по вращающемуся ролику 2. Охлаждение ролика обычно обеспечивается подачей холодного теплоносителя во внутренний канал 3.

Задача исследования теплового состояния роликов формулируется следующим образом: определить поле температур в толстостенном вращающемся цилиндре при импульсном подводе тепловой энергии по внешней образующей и непрерывном ее отводе из внутреннего канала. Толстостенный цилиндр (рис. 1,а) при построении модели может рассматриваться как одномерный (рис. 1,б), двухмерный (рис. 1,в) или трехмерный (рис. 1,г) объект.

При решении задачи в одномерной постановке рассматривается описание теплопроводности в простейшей цепи ячеек, моделирующей стержень постоянного поперечного сечения, с нестационарными краевыми условиями. Текущее тепловое состояние стержня представляется распределением температуры по ячейкам в виде вектора T . Процесс наблюдается в дискретные моменты времени $t^k=(k-1)\Delta t$, где Δt – продолжительность, а k – номер временного перехода. Эволюция вектора T описывается рекуррентным матричным равенством

$$T^{k+1}=PT^k, \quad (1)$$

где P – матрица теплопроводности.

Элементы этой матрицы определяются следующим образом

$$P = \begin{bmatrix} 1-d & d & \dots & 0 & 0 & 0 \\ d & 1-2d & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & d & 1-2d & d \\ 0 & 0 & \dots & 0 & d & 1-d \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где

$$d = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\Delta t}{\Delta x^2}, \quad (3)$$

λ , c и ρ – коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность материала стержня, Δx – размер ячейки.

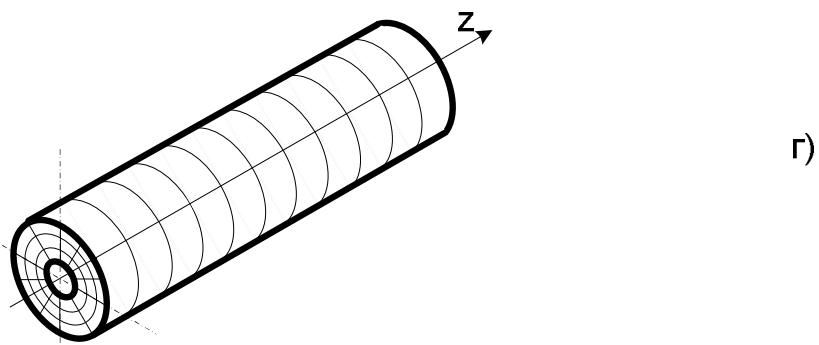
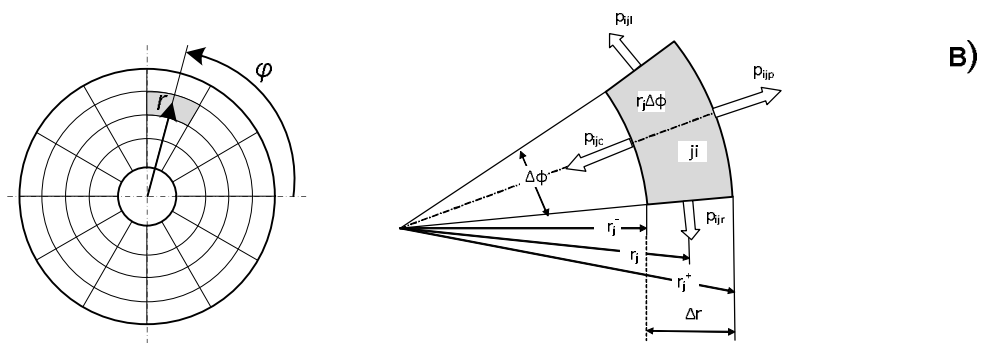
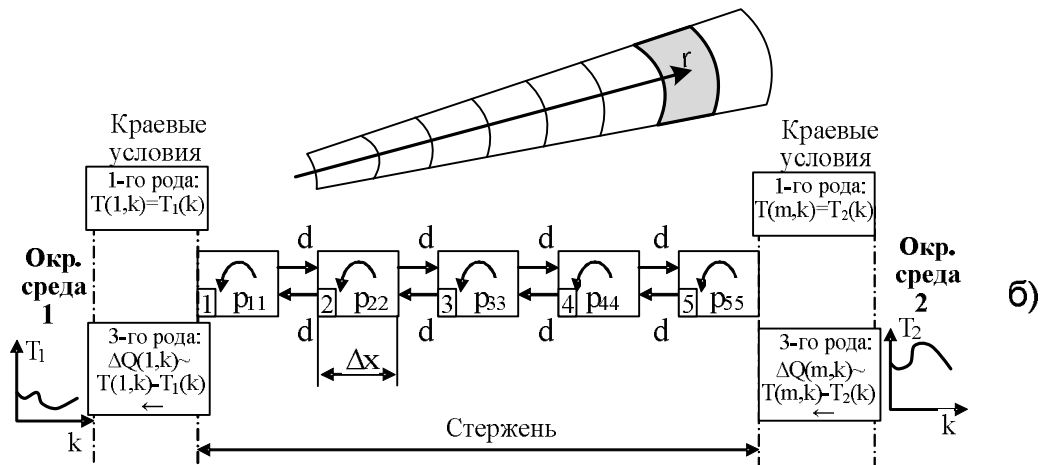
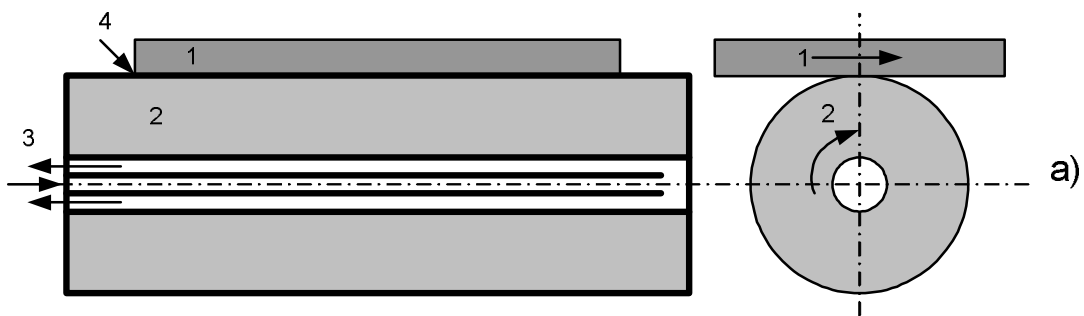


Рис. 1. Эскиз объекта исследования (а), одномерная (б), двухмерная (в) и трехмерная (г) расчетные схемы объекта: 1 – сляб; 2 – ролик; 3 – схема потоков охлаждающей жидкости; 4 – граница сляба

Величина d показывает долю теплоты, переносимую в соседнюю ячейку путем теплопроводности за время Δt (иногда ее называют сеточным критерием Фурье).

При задании краевых условий 1–го рода на каждом переходе следует использовать соотношения, присваивающие крайним ячейкам заданную (в общем случае – переменную) температуру

$$T(m,k)=T_2(k), \quad (4)$$

$$T(1,k)=T_1(k), \quad (5)$$

где $T_1(k)$ и $T_2(k)$ – температура среды слева и справа от стержня.

При использовании граничных условий 3–го рода на концах стержня задаются условия теплообмена с окружающей средой путем теплоотдачи. В течение очередного временного перехода крайним ячейкам передается количество тепла, определяемое обычными соотношениями теплоотдачи

$$\Delta Q_2(k)=\alpha_2 S(T_2(k)-T(m,k))\Delta t, \quad (6)$$

$$\Delta Q_1(k)=\alpha_1 S(T_1(k)-T(1,k))\Delta t, \quad (7)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, S – площадь поверхности теплообмена (поперечного сечения стержня).

Используя соотношения теплового баланса $Q_2(k):=Q_2(k)+\Delta Q_2(k)$ для правой ячейки и учитывая, что $Q=c\rho VT=c\rho S\Delta xT$, можно записать изменение температуры крайних ячеек в течение временного перехода

$$T(m,k) := T(m,k) + \frac{\alpha_2 \Delta t}{\rho c \Delta x} (T_2(k) - T(m,k)) = T(m,k) + a_2 (T_2(k) - T(m,k)), \quad (8)$$

$$T(1,k) := T(1,k) + \frac{\alpha_1 \Delta t}{\rho c \Delta x} (T_1(k) - T(1,k)) = T(1,k) + a_1 (T_1(k) - T(1,k)), \quad (9)$$

где $:=$ – оператор присваивания, а безразмерные параметры a_1 , a_2 – параметры теплоотдачи.

Наиболее общий пример численного эксперимента, демонстрирующий возможности ячеечного моделирования показан на рис. 2. Здесь на левой границе приняты краевые условия 1–го рода, а на правой – смешанные. При скачкообразном изменении температуры окружающей среды на том отрезке времени, когда она равна 800^0C , используется краевое условие 1–го рода (прямой контакт с горячим источником без термического сопротивления), а на том отрезке времени, когда она равна 100^0C , использовано краевое условие 3–го рода – теплоотдача в окружающую среду.

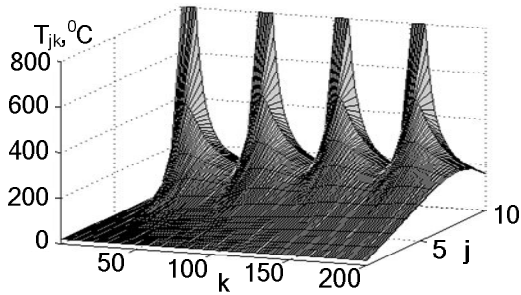


Рис. 2. Эволюция распределения температуры в стержне при нестационарных смешанных краевых условиях на внешнем торце и 1-го рода на внутреннем ($d=0,1$; $a_2=0,1$)

При рассмотрении задачи в двухмерной (рис. 1,в) постановке тепловое состояние сечения удобно представить матрицей запасов теплоты в ячейках

$$Q_m = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \dots & \dots \\ Q_{21} & Q_{22} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Q_{m1} & Q_{m2} & \dots & Q_{mn} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Здесь специфика разбиения круга на ячейки указанным на рис. 1,в образом приводит к тому, что запасы теплоты в ячейках не пропорциональны

только их температурам, так как ячейки имеют не одинаковый объем. Считая высоту цилиндра равной единице, отождествим объем ячейки с ее площадью в плане

$$F_{ij} = r_i \Delta \varphi \Delta r, \quad (11)$$

и представим совокупность всех площадей матрицей F_m или получаемым из нее по правилу (11) вектором F . Тогда матрица температур может быть рассчитана по матрице запасов теплоты следующим образом

$$T_m = Q_m / (\rho c F_m), \quad (12)$$

где ρ – плотность, c – удельная теплоемкость материала цилиндра.

Кинетическое уравнение процесса имеет вид

$$Q^{k+1} = P Q^k. \quad (13)$$

Доли теплоты, переносимые из ячейки j_i в радиальном и окружном направлениях рассчитываются по формулам

$$p_{rij} = a \frac{\Delta t}{\Delta r^2} \left(1 + \frac{\Delta r}{2r_i} \right) \text{ – по радиусу к периферии}, \quad (14)$$

$$p_{cij} = a \frac{\Delta t}{\Delta r^2} \left(1 - \frac{\Delta r}{2r_{i+1}} \right) \text{ – по радиусу к центру}, \quad (15)$$

$$p_{ij} = a \frac{\Delta t}{(r_i \Delta \varphi)^2} \text{ – по окружности против часовой стрелки}, \quad (16)$$

$$p_{ij} = a \frac{\Delta t}{(r_i \Delta \varphi)^2} \text{ – по окружности по часовой стрелке}. \quad (17)$$

Эволюция распределения температуры в прогреваемом через одну ячейку круге при постоянной условной температуре в ячейке, равной 1, показана на рис. 3.

Пример эволюции распределения температуры в кольцевой области показан на рис. 4, где температура обеих окружающих сред принята равной нулю, а температура источника – единице. Из графиков видно, что асимптотическое распределение является нестационарным: по ячейкам в угловом направлении движется возмущение температуры, которое резко выражено для периферийных ячеек, но быстро затухает по радиусу. Разные условия охлаждения на

внешнем и внутреннем радиусе приводят, однако, к значительному перекошу температуры в радиальном направлении. В сочетании с заметной нестационарностью температуры в периферийной зоне кольца это приводит к возникновению значительных термических напряжений в ролике, влияющих на надежность и долговечность его работы.

При трехмерной постановке задачи (см. рис. 1,г) вектор состояния системы $S=\{S_i\}$ размером $1*n$ определяется распределением теплоты по ячейкам.

Метод расчета процессов теплопроводности при трехмерной постановке задачи также базируется на ячеечной методологии. В качестве искомой функции выбрано распределение теплоты по ячейкам в трехмерном пространстве. Схема разбиения ролика на ячейки представлена на рис. 5. Полученный многомерный массив ячеек сворачивается в одномерную матрицу (вектор–строку) из этих же ячеек. Распределение теплоты по ячейкам представляется вектором $S=\{S_i\}$, где индекс «i» соответствует номеру ячейки. Алгоритм расчета искомого распределения S в произвольные моменты времени включает следующие этапы. Сначала для каждой ячейки пространства определяются номера ячеек, с которыми она может взаимодействовать. Затем составляются уравнения балансов для определения потоков энергии между этими ячейками. Известные потоки энергии позволяют определить доли теплоты, переносимые в соседние ячейки за временной шаг. Для описания эволюции состояния системы выполняется суммирование тепловой энергии, переносимой из j -й ячейки в i -ю ячейку:

$$S_i^{k+1} = \sum_{j=1,n} S_j^k p_{ij}, \quad (18)$$

где p_{ij} – доля теплоты переносимая из j -й в i -ю ячейку; индекс k соответствует номеру шага по времени.

Доли теплоты, переносимые в соседние ячейки, расположенные в одном поперечном сечении ролика (вдоль осей r, φ), находятся аналогично двухмерной модели согласно (14)–(16). Доли теплоты, переносимые в соседние ячейки вдоль оси z определяются аналогично одномерной модели (2)–(3).

Предложенный метод (18) по сравнению с традиционными матричными методами позволяет существенно экономить машинные ресурсы за счет исключения операций с нулевыми элементами и достаточно просто решать задачи в многомерной постановке. На программный комплекс, реализующий предложенный алгоритм, получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

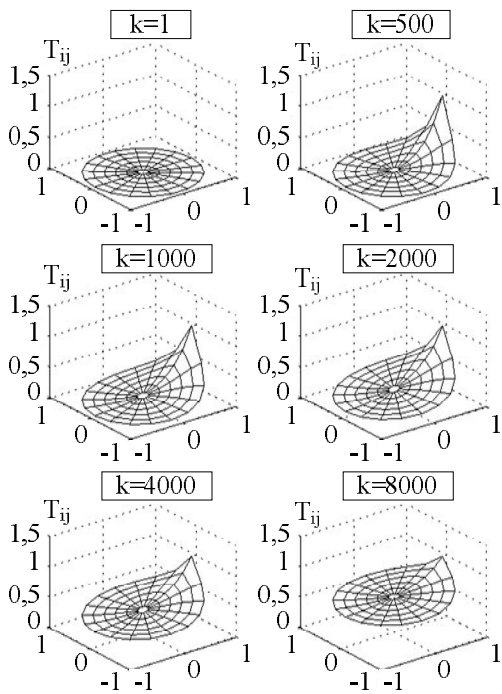


Рис. 3. Эволюция распределения температуры при неподвижном локальном источнике ($a=0,003 \text{ м}^2/\text{с}$, $\Delta t=1 \text{ с}$, $a_2=0,002$)

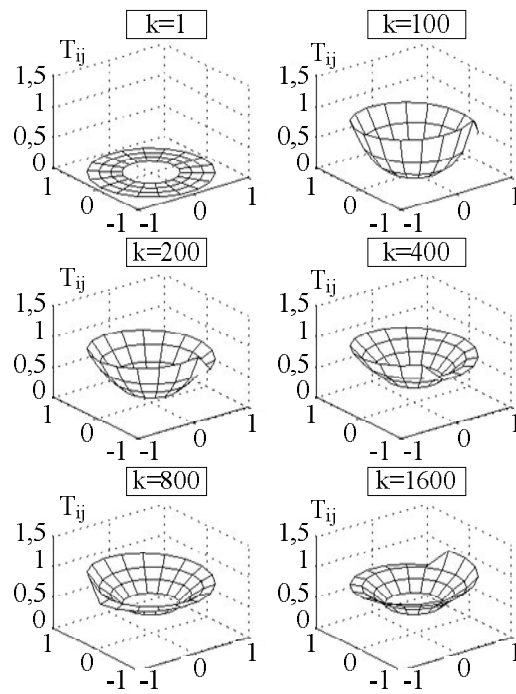


Рис. 4. Эволюция распределения температуры при перемещающемся по окружности локальном источнике при внутренней и внешней теплоотдаче ($a=0,003 \text{ м}^2/\text{с}$, $\Delta t=1 \text{ с}$, $a_1=0,01$, $a_2=0,002$)

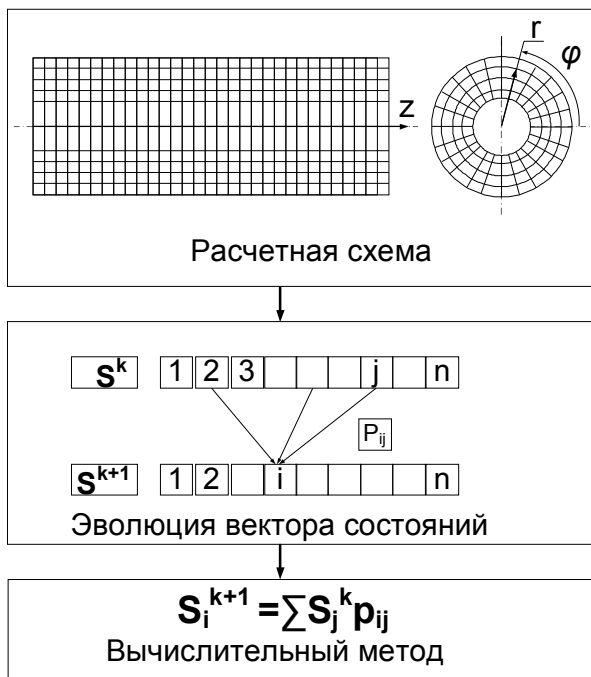


Рис. 5. Алгоритм построения вычислительного процесса для трехмерной модели ролика

Для проверки адекватности предложенной модели теплового состояния ролика выполнено сопоставление результатов расчетных, полученных с использованием предложенной модели, с результатами экспериментальных исследований, полученными из литературных источников. Результаты проведенного сопоставления, приведенные на рис. 6, показывают адекватное описание предложенной трехмерной моделью реального процесса при нестационарной тепловой нагрузке.

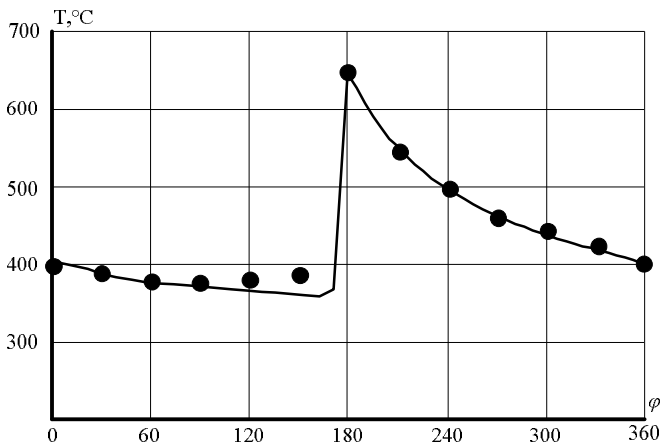


Рис. 6. Сравнение экспериментальной (точки) и расчетной (линия) зависимостей температуры поверхности ролика от угловой координаты

го поля, которым, как правило, соответствуют и максимальные значения термических напряжений.

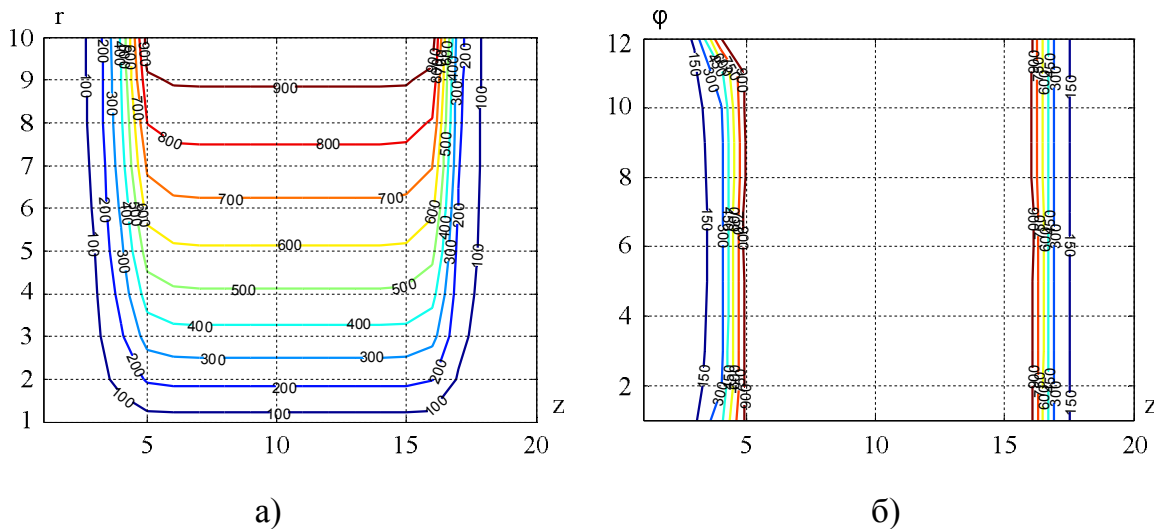


Рис. 7. Поле температур в вертикальном сечении zOr ролика (а) и развертке внешней поверхности ролика (б) для $k=500$, $T_m=1000$

Таким образом, полученные результаты численного исследования показали, что наиболее полно учитывать влияние технологических особенностей на тепловое состояние ролика позволяет трехмерная модель. Численный расчетный анализ позволил выявить области с наибольшим градиентом температур, которые представляют наибольшую опасность с точки зрения термических напряжений.

В третьей главе на основании результатов исследования теплового состояния ролика, представленных во второй главе, предложена методика оценки термических напряжений в ролике, которые обуславливаются найденными температурными полями. Оценка температурных напряжений в ролике проводится в рамках одномерной, двухмерной и трехмерной моделей, на основании известных из литературных источников подходов и их модификаций.

В диссертации для оценки термических напряжений в ролике предложен модифицированный подход, базирующийся на известном из литературы термоупругом потенциале перемещений. Значения функции термоупругого потенциала перемещений F , производные которой по координатам дают непосредственно перемещения, находятся из уравнения Пуассона

$$\Delta F = \frac{1 + \mu}{1 - \mu} \alpha T .$$

Решение уравнения Пуассона позволяет определить термические напряжения в ролике, согласно известным выражениям, в виде

$$\sigma_{ik} = 2G \left[\frac{\partial^2 F}{\partial i \partial k} - \Delta F \delta_{ik} \right]; \delta_{ik} = \begin{cases} 0, & \text{при } i \neq k \\ 1, & \text{при } i = k \end{cases}; (i, k = r, \varphi, z) \quad (19)$$

где Δ – оператор Лапласа, μ – коэффициент Пуассона, α – коэффициент линейного расширения, σ – величина термических напряжений, G – модуль сдвига.

Результаты расчета термических напряжений согласно (19) представлены на рис. 8. в виде проекций значений трехмерного распределения эквивалентных напряжений для каждой ячейки ролика на ось z .

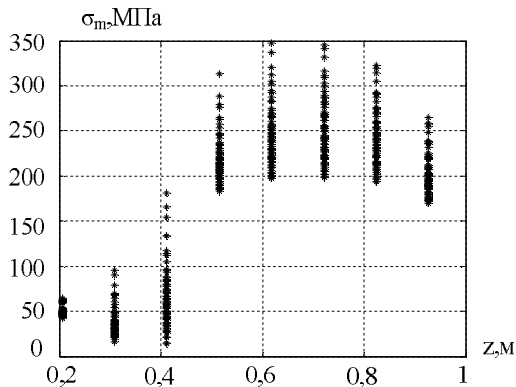


Рис. 8. Проекция поля значений эквивалентных термических напряжений по Мизесу (МПа) в разных сечениях ролика на ось z

Опасные режимы работы ролика характеризуются значениями приведенных термических напряжений больше единицы.

В четвертой главе рассмотрены вопросы практического использования результатов работы. Результаты исследований технологических режимов эксплуатации роликов с целью разработки мероприятий, направленных на повышение надежности эксплуатации и увеличение срока службы оборудования, приведены на рис. 9, 10. На рис. 9 показана расчетная зависимость проекции приведенных термических напряжений вдоль оси ролика при нормальной скорости литья (скорость литья 1 м/мин) и максимальной температуре поверхности ролика равной 500⁰С. Значение приведенных термических напряжений при этом меньше единицы. При аварийном останове, когда скорость литья становится нулевой, максимальное значение приведенных термических напряжений

показывает практически двукратное превышение значениями термических напряжений величины предела текучести. На основании расчетных исследований разработаны рекомендации по ведению режимов охлаждения роликов и эксплуатации МНЛЗ.

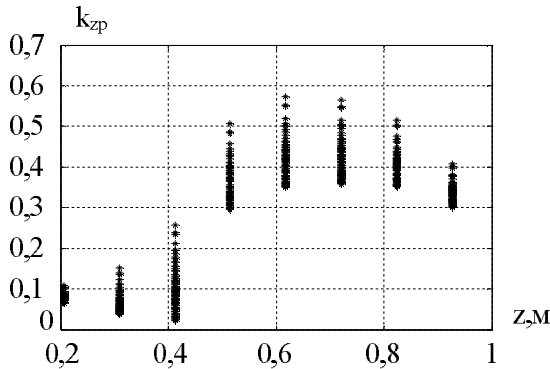


Рис. 9. Зависимость приведенных термических напряжений при максимальной температуре поверхности ролика 500°C (скорость литья 1 м/мин) ($t_{g2}=50^{\circ}\text{C}$)

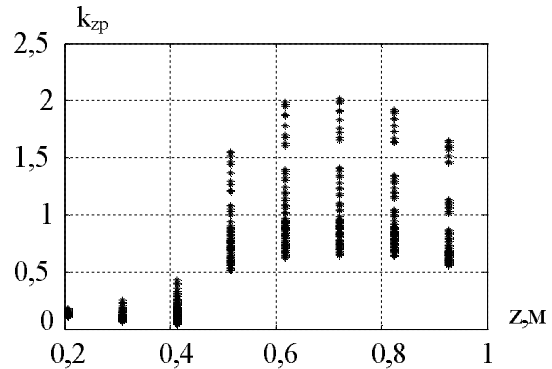


Рис. 10. Зависимость приведенных термических напряжений при максимальной температуре поверхности ролика 780°C (скорость литья 0 м/мин) ($t_{g2}=50^{\circ}\text{C}$)

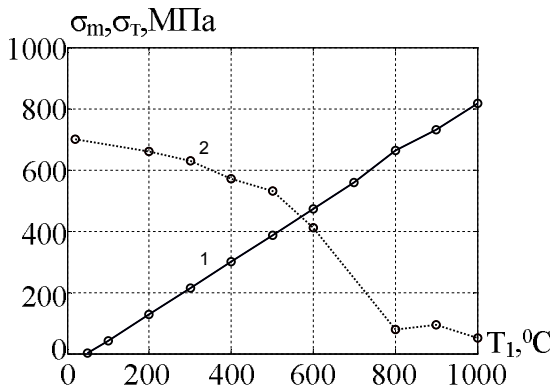


Рис. 11. Зависимость максимального значения эквивалентных термических напряжений (МПа) в ролике от температуры внешней поверхности ролика в месте контакта ролика со слябом (1) и зависимость предела текучести металла от температуры (2)

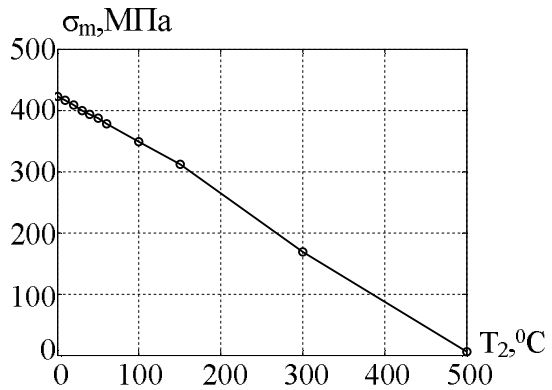


Рис. 12. Зависимость максимального значения эквивалентных термических напряжений по Мизесу (МПа) в ролике от значения температуры на поверхности ролика внутри охлаждаемого канала ($t_{g1}=500^{\circ}\text{C}$)

На рис. 11 показана расчетная зависимость максимального значения эквивалентных термических напряжений в ролике от температуры металла на внешней поверхности ролика в месте контакта ролика со слябом. Значение температуры на внутренней охлаждаемой водой поверхности ролика принимается равным $t_{g2}=50^{\circ}\text{C}$. При совпадении температур металла на внешней и внутренней поверхностях ролика температурные напряжения принимают практически нулевые значения. Данная тестовая проверка подтверждает достоверность предложенного метода определения термонапряженного состояния ролика и алгоритмов его компьютерной реализации.

На рис. 12 приведена расчетная зависимость максимального значения эквивалентных термических напряжений в ролике от температуры металла на

внутренней поверхности ролика. При совпадении значений температур металла на внутренней и внешней поверхности ролика температурные напряжения в данном случае также принимают практически нулевые значения.

В ходе дополнительного расчетного исследования выявлено влияние величины солевых отложений во внутреннем канале ролика на температурные поля и термические напряжения. Также проведен анализ влияния скорости литья и расхода охлаждающей воды на тепловое и напряженное состояние ролика.

При известных характеристиках материала ролика и режиме его охлаждения приведенный подход позволил оценить напряженное состояние ролика, выбрать технологические режимы для системы охлаждения роликов, обеспечивающие надежную и безаварийную работу оборудования. Предложенный метод расчета теплового и напряженного состояния ролика вместе с системой его компьютерной поддержки, а также рекомендации для системы охлаждения роликов, направленные на обеспечение надежной и безаварийной работы оборудования, внедрены в конвертерном производстве ОАО «Северсталь». Модифицированный матричный метод решения задачи нестационарной теплопроводности, алгоритм и программа для его компьютерной реализации внедрены и используются в Ченстоховском университете (Польша) при выполнении научных и проектных исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана математическая модель теплового состояния охлаждаемых полых цилиндров с нестационарной тепловой нагрузкой, вызванной импульсным подводом тепловой энергии по внешней образующей и постоянным отводом тепловой энергии от внешней и внутренней поверхностей толстостенного цилиндра.

2. Разработан модифицированный матричный метод решения задачи нестационарной теплопроводности, алгоритм и программа для его компьютерной реализации при различной размерности модели объекта и выбранных краевых условиях.

3. Предложена методика оценки термических напряжений в роликерольганга при заданном температурном поле и импульсном подводе тепловой энергии и выявлено влияние внутреннего охлаждения на его термонапряженное состояние.

4. Разработан программный пакет для расчета процесса теплопроводности во вращающемся цилиндре при импульсном подводе теплоты, защищенный свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ (№2012611546 от 10 февраля 2012 года).

5. Разработанная математическая модель и ее программно-алгоритмическое обеспечение являются основой достоверного расчета теплового и термонапряженного состояния роликов рольгангов при их проектировании и модернизации.

6. Результаты работы нашли практическое применение при выполнении научно-исследовательских проектов в Ченстоховском университете (Польша), а также внедрены в конвертерном производстве ОАО «Северсталь».

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Жуков, П.В. Расчет температурных полей и термических напряжений в толстостенном цилиндре при импульсном подводе теплоты [Текст] / П.В. Жуков // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та – 2013. – Вып. 3.– С. 54–57.

2. Мизонов, В.Е. Исследование переходных процессов теплообмена в толстостенных охлаждаемых цилиндрах с импульсным подводом теплоты [Текст] / В.Е. Мизонов, В.Н. Виноградов, П.В. Жуков // Вестн. Ивановского гос. энергетич. ун-та – 2009. – Вып. 3. – С. 17–20.

3. Болотов, И.А. Моделирование распределения содержания влаги во вращающемся пористом цилиндре [Текст] / И.А. Болотов, В.Е. Мизонов, В.А. Зайцев, П.В. Жуков // Изв. вузов. Химия и химическая технология. –2010. – Т. 53. – Вып. 8. – С.97–99.

4. Болотов, И.А. Моделирование теплопроводности в кольцевой области с нестационарными краевыми условиями [Текст] / И.А. Болотов, П.В. Жуков, В.Е. Мизонов и [др.] // Изв. вузов. Химия и химическая технология. –2012. – Т. 55. – Вып. 1. – С.104–107.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ "Расчет процесса теплопроводности во вращающемся цилиндре при импульсном подводе теплоты №2012611546 от 10 февраля 2012 года" Авторы: Жуков В.П., Беляков А.Н., Жуков П.В.

Публикации в других изданиях

6. Болотов И.А., Мизонов В.Е., Зайцев В.А., Жуков П.В. Математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса во вращающихся телах: Монография/ Иван. гос. хим.-технол. ун-т, Иван. гос. энергетич. ун-т. – Иваново, 2010. – 56 с. ISBN 978–5–9616–0365–1

7. Виноградов, В.Н. Моделирование теплообмена во вращающихся толстостенных цилиндрах [Текст]/ В.Н. Виноградов, В.Е. Мизонов, П.В. Жуков // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития электротехнологии" (XV Бенардосовские чтения). – Иваново. – 2009. – Т.2. – С. 96.

8. Жуков, П.В. Решение задач теплопроводности и термоупругости для вращающегося полого цилиндра с импульсным подводом теплоты [Текст]/ П.В. Жуков, В.Н. Виноградов, С.А. Добротин //Материалы XVI Межд. науч. техн. конф. Бенардосовские чтения "Состояние и перспективы развития электротехнологии". – Иваново. – 2011. – Т.2. – С. 325–328.

9. Жуков, П.В. Математическое моделирование и расчет теплового и напряженного состояния роликов рольганга [Текст]/ П.В. Жуков, В.Е. Мизонов, В.Н. Виноградов //Материалы XVII Межд. науч. техн. конф. Бенардосовские чтения "Состояние и перспективы развития электротехнологии". – Иваново. – 2013. – Т.2. – С.335–327.

10. Жуков, П.В. Математическое моделирование теплового состояния роликов рольганга с внутренним охлаждением [Текст]/ П.В. Жуков,

В.Е. Мизонов // Сб. трудов XXII МНК «Математические методы в технике и технологиях ММТТ–22». – Псков. – 2009. – Т.11. – С. 67–68.

11. Жуков, П.В. Моделирование неосесимметричного тепломассопереноса во вращающемся цилиндре [Текст]/ П.В. Жуков, И.А. Болотов, В.Е. Мизонов, С.А. Добротин // Сб. трудов XXIII МНК «Математические методы в технике и технологиях ММТТ–23». – Саратов. – 2010. – Т.8. – С. 92–94.

12. Жуков, П.В. Теплопроводность во вращающемся цилиндре с импульсным подводом теплоты [Текст]/ П.В. Жуков, В.Е. Мизонов, В.Н. Виноградов, С.А. Добротин // Сб. трудов XXIV МНК «Математические методы в технике и технологиях ММТТ–24». –Саратов– 2011. – Т.7. – С.16–17.

13. Жуков, П.В. Идентификация модели теплопроводности в полом цилиндре с импульсным подводом теплоты [Текст]/ П.В. Жуков, В.Е. Мизонов, В.Н. Виноградов // Сб. трудов XXV МНК «Математические методы в технике и технологиях ММТТ–25», Волгоград: Волгогр. гос. техн. ун–т – 2012. – Т.7. – С.43–45.

14. Жуков, П.В. Исследование термонапряженного состояния ролика машины непрерывного литья заготовок [Текст]/ П.В. Жуков, В.Е. Мизонов, В.Н. Виноградов // Сб. трудов XXVI МНК «Математические методы в технике и технологиях ММТТ–26», Нижний Новгород: Нижегородский. гос. техн. ун–т– 2013. – Т.7. – С.31–33.

15. Жуков, П.В. Применение теории цепей Маркова к моделированию теплового процесса в ролике рольганга [Текст] / П.В. Жуков, С.А. Добротин, В.Е. Мизонов // Тезисы 5–й региональной научно–технической конференции студентов и аспирантов "Энергия – 2010", – Иваново: Ивановский гос. энергетич. ун–т, –2010, –Т.2. – С.140.

16. Жуков, П.В. Исследование влияния граничных условий на результаты моделирования теплового состояния вращающихся роликов [Текст] / П.В. Жуков, С.А. Добротин, В.Е. Мизонов// Материалы региональной науч.–техн. конф. студ. и асп. «Энергия – 2012».–Иваново: Ивановский гос. энергетич. ун–т,– 2012, –Т.4. – С.281–283.

17. Болотов, И.А. Ячеечная модель неосесимметричного тепломассопереноса в круговой области [Текст] / И.А. Болотов, П.В. Жуков, С.А. Добротин // Материалы IX Международной научной конференции «Теоретические основы энерго–ресурсосберегающих процессов, оборудования и экологически безопасных производств», – Иваново, –2010, –С. 267.

ЖУКОВ ПАВЕЛ ВЛАДИМИРОВИЧ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ ПОЛЫХ ЦИЛИНДРОВ С НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛООВОЙ НАГРУЗКОЙ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук.

Подписано в печать 12.09.2013. Формат 60X84 1/16

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ №114.

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ

153003, г.Иваново, ул. Рабфаковская,34.