

ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 658

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-25-34](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-25-34)

Логунова О.С., Агапитов Е.Б., Баранкова И.И.,
Андреев С.М., Чусавитина Г.Н.



Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ТЕЛ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ

Целью исследования является систематизация проблем и способов их разрешения, связанных с изучением теплового состояния тел и расплавов в промышленном производстве. Выделены проблемы, характерные для металлургического предприятия, в частности: математическое моделирование электромагнитных полей в системах индукционного нагрева продукции метизной отрасли; построение информационного обеспечения энергосберегающего режима нагрева заготовок перед прокаткой в нагревательной печи проходного типа; применение классических уравнений тепломассообмена и многофакторного анализа для моделирования процессов в агрегате печь-ковш (АПК); развитие псеводинамической и квазидинамической моделей для описания теплового состояния протяженного тела. Все указанные задачи имеют тепловую природу и, несмотря на различие объектов исследования, при решении используют математические модели для исследования теплового состояния тел и управления тепловыми процессами. Реализация математических моделей выполнена с использованием современного программного обеспечения средств вычислительной техники. Все исследования проведены научными направлениями в ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», имеют широкую апробацию и внедрение в действующее производство.

Ключевые слова: математическое моделирование, металлургические процессы, управление тепловыми процессами, металлургические агрегаты, псевдо- и квазидинамика .

ВВЕДЕНИЕ

Тепловые явления и процессы являются самыми распространенными в окружающем мире. Они занимают второе место после механического движения. Открытие законов протекания тепловых явлений и процессов позволило применять их на практике и в технике, конструирование тепловых двигателей, холодильных установок и многие другие устройства на основе этих законов. Тепловые процессы и явления связаны с нагревом или охлаждением тел и требуют разработки систем управления.

Основные положения теории тепломассопереноса разрабатывались в течение длительного времени. Известны фундаментальные труды Лыкова А.В., Борисова В.Т., Журавлевва В.А., Самойловича Ю.А., в которых изложены основы теплопроводности и их применения для описания теплового состояния тел типовой и любой произвольной формы [1-4], а также особенности их применения для технологических процессов, в которых главной составляющей является перенос тепла и массы [4-6]. К таким технологическим процессам относятся нагрев тел и жикостей, перемешивание жидких горячих расплавов, охлаждение горячих тел и жидких расплавов при затвердевании. Для металлургического производства эти процессы характерны для выплавки стали, обработки металлов в АПК, охлаждение заготовок на технологической линии машин непрерывного литья заготовок, нагрева заготовок в нагревательных печах и при индукционном нагреве.

Современным направлением является включение в математические модели параметров, характеризующих свойства материалов, которые изменяются во времени и являются функциями температуры материала или расплава. Введение функциональных зависимостей позволяет выполнить моделирование тепловых процессов в

зональных агрегатах. В указанных агрегатах затруднены прямые измерения по методикам, приведенным в [7, 8]. Однако математические модели с переменными свойствами материала необходимы при создании новых конструкций металлургических агрегатов [9-11], разработке новых функций автоматизированных систем управления технологическими процессами [12-14].

Моделирование является одним из основных методов научных исследований и, в том числе, тепловых процессов. Компьютерное моделирование является инструментом для решения сложнейших практических и теоретических проблем науки и техники. В основе компьютерного эксперимента лежит математическая модель, которая содержит формализованное описание объекта изучения, включающее числовые параметры, константы, ограничения, а также аналитические зависимости. При отсутствии известных аналитических закономерностей используются современные технологии на основе искусственных нейронных сетей, теории нечетких множеств и нечеткой логики, древовидных структур и их комбинации.

Именно благодаря важной роли в научных исследованиях, математическое моделирование активно внедряется в систему высшего образования. Подготовка бакалавров, магистров и аспирантов по группам: 01 «Математика и механика», 02 «Компьютерные и информационные науки», 09 «Информатика и вычислительная техника», 44 «Образование и педагогические науки» включает ряд дисциплин, связанных с моделированием явлений и процессов.

Высокая востребованность результатов моделирования привела к активной разработке программных средств, таких как: Matlab для реализации моделей; AnyLogic для имитационного моделирования на языке Java с библиотекой визуальных компонентов и позволяющая создавать 2D- и 3D- анимацию для эффективного проведения вычислительного эксперимента [15-17].

В ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» сложилось несколько научных направлений, которые, применяя основы теплотехнического исследования и математического моделирования, проводят научные исследования в области изучения и управления тепловыми процессами для металлургических объектов. В данной работе приводятся примеры построения и реализации моделей для металлургической области.

**ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В СИСТЕМАХ
ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА
ПРОДУКЦИИ МЕТАЛЛОЗОИДНОЙ ОТРАСЛИ**

Индукционный нагрев массивных тел требует решения одной из задач по определению теплового состояния массивных тел и содержит три подзадачи: распространение электромагнитной энергии в системе; возникновение источников теплоты внутри нагреваемых объектов; передача теплоты в системе [18, 19]. Учитывая факт неоднородности свойств изучаемых тел, возникает необходимость в экспериментальном изучении процессов или в использовании интегральных распределений вероятности [20, 21]. Учитывая указанные особенности системы, обобщенная математическая модель включает несколько частей: имитационная модель свойств нагреваемого объекта, модель для определения напряженности электромагнитного поля на поверхности объекта, модель для определения влияния электромагнитного поля на интенсификацию теплообмена, электротепловая модель для определения тепловых полей внутри объекта.

Модель для определения напряженности электромагнитного поля на поверхности нагреваемых тел описывает распространение электромагнитной энергии в системе и содержит уравнения электродинамики в интегральной форме. Модель для определения влияния электромагнитного поля на интенсификацию теплообмена описывает влияние электромагнитного поля системы на возникновение вибрации витков проволоки, вызывающей дополнительный перенос теплоты. Электротепловая модель термообработки бунтов проволоки описывает распространение электромагнитной волны в исследуемом объекте. Она базируется на решении уравнения теплопроводности Фурье с внутренними источниками теплоты с переменными коэффициентами.

Все численные методы расчета электромагнитных полей можно отнести к двум различным постановкам задачи. Первая основана на описании электромагнитного поля дифференциальными уравнениями Максвелла второго порядка с соответствующими граничными условиями. Вторая постановка задачи основана на теории дальнодействия и заключается в том, что поле в любой точке определяется как сумма полей, создаваемых всеми источниками, первичными и вторичными. Первичными являются сторонние источники (точки, заряды), вносимые в систему. Вторичные источники определяют поле реакции тел, составляющих систему, на поле первичных источников. При этом все тела заменяются распределенными в их объеме источниками, взаимодействие между которыми определяется в вакууме.

Интегральные методы удобны для расчета квазистационарных систем, в которых можно пренебречь запаздыванием сигнала. Все индукционные устройства подчиняются этому условию. Важным достоинством метода является то, что расчет производится только для областей, занятых вторичными источниками. Естественными вторичными источниками здесь являются круговые токи проводимости загрузки, плотность которых заранее неизвестна. Учет воздействия на отдельный элемент всех токов приводит к уравнению Фредгольма второго рода относительно плотности тока этого элемента, справедливое относительно всех элементов загрузки:

$$2\pi R_Q \rho_Q j_Q + j\omega \int_{S_A} M_{QP} J_p dS_p = -j\omega \int_{S_B} M_{QT} J_T dS_T, \quad (1)$$

где M_{QP} и M_{QT} – взаимные индуктивности объемных колец с равномерным распределением тока в них, Гн; R_Q – радиус кольца Q , м; ρ_Q – удельное сопротивление материала, Ом/м; J_Q, J_P, J_T – круговые токи проводимости колец Q, P, T, A ; j – плотность тока, А/м³; ω – круговая частота, 1/с.

Расчет взаимных индуктивностей зависит от расположения элементов и определяется с помощью полных эллиптических интегралов первого и второго рода. В общем случае записываются как

$$M_{QP} = \frac{1}{l_Q l_P} \int \int \mu_0 r \left[\left(1 - \frac{k^2}{2} \right) K - E \right],$$

где E, K – полные эллиптические интегралы первого и второго рода от модуля k ; l_Q, l_P – длина соленоидов Q, P , м; r – радиус соленоидов, м; k – модуль, определяемый формулой

$$k^2 = \frac{4R_Q}{\rho R_P},$$

где R_Q, R_P – радиусы колец Q и P , м; ρ – удельное сопротивление материала, Ом/м.

Интегральное уравнение (1) является уравнением Фредгольма второго рода. В общем виде уравнение Фредгольма второго рода можно записать как

$$x(t) = \lambda \int_a^b Q(t, s) x(s) ds + f(t), \quad (2)$$

где $x(t)$ – решение уравнения на отрезке $[a, b]$; $f(t)$ – заданная функция – свободный член на отрезке $[a, b]$; $Q(t, s)$ – ядро интегрального уравнения на множестве точек квадрата $[a, b] \times [a, b]$.

Для некоторых уравнений с ядрами определенной структуры имеются формулы, позволяющие найти точное решение $x(t)$. Так, например, решение уравнения (2) с вырожденным ядром

$$Q(t, s) = \sum_{i=1}^m p_i(t) q_i(s)$$

имеет вид

$$x(t) = \lambda \sum_{i=1}^m z_i p_i(t) + f(t), \quad (3)$$

где числа z_i являются решениями системы линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} z_1 - \lambda c_{11} z_1 - \lambda c_{12} z_2 - \dots - \lambda c_{1m} z_m = d_1; \\ z_2 - \lambda c_{21} z_1 - \lambda c_{22} z_2 - \dots - \lambda c_{2m} z_m = d_2; \\ \dots \\ z_m - \lambda c_{m1} z_1 - \lambda c_{m2} z_2 - \dots - \lambda c_{mm} z_m = d_m, \end{cases} \quad (4)$$

в которой

$$c_{ij} = \int_a^b q_i(s) p_j(s) ds, \quad d_{ij} = \int_a^b q_i(s) f(s) ds.$$

Если определитель системы (4) отличен от нуля, то решение (3) существует и оно единственное. Умение находить точное решение интегрального уравнения с вырожденным ядром порождает приближенный метод, в основе которого лежит замена одного уравнения другим, ядро которого вырождено и в каком-то определенном смысле близко к данному. Кроме вышеупомянутого метода замены ядра на вырожденное, имеется ряд других приближенно-аналитических методов решения интегральных уравнений. Из них отметим метод последовательных приближений, в котором итерационный процесс строится аналогично методу простой итерации для нелинейного уравнения, а начальное приближение искомой функции $x_0(t)$ полагают равным нулю. Тогда для любого $(k+1)$ -го приближения получим

$$x_{k+1}(t) = \lambda \int_a^b Q(t,s) x_k(s) ds + f(s), \quad k = \overline{0, \infty}.$$

При непрерывных функциях $Q(t,s)$ и $f(t)$ существование единственного непрерывного решения можно установить при условии, что

$$|\lambda| < \frac{1}{C(b-a)},$$

где $C = \max_{t,s \in [a,b]} |Q(t,s)|$.

Наиболее универсальными и хорошо приспособленными для компьютерных вычислений являются численные методы решения интегральных уравнений. Их построение опирается на замену интеграла в интегральном уравнении конечной суммой на базе какого-либо квадратурной формулы.

Пусть для вычисления определенного интеграла используется некая конкретная квадратурная формула:

$$\int_a^b \phi(s) ds \approx \sum_{j=1}^n A_j \phi(s_j). \quad (5)$$

Подставим правую часть приближенного равенства (5) $\phi(s) = Q(t,s)x(s)$ вместо интеграла в интегральное

уравнение Фредгольма второго рода (2). В результате этого получаем:

$$x(t) \approx \lambda \sum_{j=1}^n A_j Q(t, s_j) + f(t), \quad (6)$$

где $x(t)$ – приближенное представление решения через n его значений $x(s_j), j = \overline{1, n}$.

Чтобы вычислить эти значения, станем рассматривать равенство (6) не при всех $t \in [a, b]$, а лишь на системе точек $t_j, j = \overline{1, n}$, совпадающих соответственно с узлами $s, j = \overline{1, n}$ квадратурной формулы (5). Таким образом, приходим к n равенствам вида

$$x(t_i) \approx \lambda \sum_{j=1}^n A_j Q(t_j, s_j) + f(t_j), \quad j = \overline{1, n}. \quad (7)$$

Положим для краткости:

$$Q_{ij} = Q(t_j, s_j), \quad f_i = f(t_j), \quad x_i \approx x(t_i) (= x(s_i)).$$

Тогда (7) преобразуется к системе n линейных алгебраических уравнений с n неизвестными, которая выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} (1 - \lambda A_1 Q_{11}) x_1 - \lambda A_2 Q_{12} x_2 - \dots - \lambda A_n Q_{1n} x_n = f_1; \\ \lambda A_1 Q_{21} x_1 - (1 - \lambda A_2 Q_{22}) x_2 - \dots - A_n Q_{2n} x_n = f_2; \\ \dots \\ \lambda A_1 Q_{n1} x_1 - \lambda A_2 Q_{n2} x_2 - \dots - (1 - \lambda A_n Q_{nn}) x_n = f_n. \end{cases}$$

Найдя решение системы, получаем n чисел $x_i, i = \overline{1, n}$ – каркас приближенного решения интегрального уравнения на сетке $t_j, j = \overline{1, n}$. Если нам только и нужна эта таблица приближенных значений решения интегрального уравнения (2) в точках $t_j, j = \overline{1, n}$, то в такой постановке задача решена. Если же нужны значения решения в других точках $t \in [a, b]$ или требуется знать решение $x(t)$ в аналитическом виде, подставляем найденные значения $x_j \approx x(s_j)$ в равенство (6) или аппроксимируем их.

Для контроля точности численного решения интегрального уравнения квадратурным методом может служить принцип Рунге сравнения значений приближенных решений в общих узлах двух разных сеток.

Предлагаемое решение с использованием метода конечных сумм и метода Монте-Карло позволяет выполнить моделирование теплового состояния объекта с неоднородным распределением свойств по его объему.

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕМ РЕЖИМЕ НАГРЕВА ЗАГОТОВОВОК В МЕТОДИЧЕСКИХ ПЕЧАХ

Нагрев металла перед прокаткой является одним из самых энергоемких процессов получения сортового и листового проката на станах горячей прокатки. До 20% потребляемого топлива расходуется в процессе нагрева заготовок. Эффективность работы нагревательных печей для нагрева металла определяет качество продук-

ции и себестоимость проката. Поэтому решение задачи повышения эффективности управления процессом нагрева заготовок перед прокаткой с целью минимизации затрат топлива и получения требуемых качественных показателей имеет актуальное значение [22]. Определение теплового состояния нагреваемой заготовки выполняется на основе псевдодинамической математической модели, включающей уравнение теплопроводности с граничными условиями третьего рода на поверхности.

Новой концепцией управления является повышение эффективности управления процессом нагрева, при котором достигаются минимальные затраты топлива и заданное качество продукции. Расчет режимов управления усложняется необходимостью согласования производительности нагревательных печей и прокатного стана. Так как производительность прокатного стана является крайне неравномерной, то при реализации энергосберегающего управления процессом нагрева требуется производить непрерывную коррекцию тепловых режимов нагревательной печи, чтобы повысить эффект от оптимального управления нагревом [23].

В Магнитогорском государственном техническом университете им. Г.И. Носова сложилось научное направление, в рамках которого используется теория оптимального управления при моделировании технологических процессов, в том числе и нагрева заготовок в методических печах. Разработаны теоретические основы оптимального управления нагревом с учетом следующих положений:

Использование информационного обеспечения автоматизированных систем управления объектов, функционирующих в энергосберегающем режиме и непрерывным мониторингом за тепловым состоянием каждой заготовки.

Контроль тепловой нагрузки по зонам нагревательной печи и ее перераспределение по зонам необходимо направлять на достижение максимальной производительности металлургического агрегата.

Информационное обеспечение энергосберегающего режима нагрева металла направлено на реализацию новых функциональных возможностей системы:

– синхронизация процесса определения опти-

мальных параметров и скорости протекания производственного процесса каждой заготовки с использованием псевдодинамической математической модели и с применением принципа максимума Л.С. Понтрягина [22];

– математическое моделирование распределения тепловых нагрузок по зонам нагревательной печи для обеспечения оптимального графика нагрева [24];

– прогнозирование минимального времени нагрева каждой заготовки на момент ее подачи в печь, последующей коррекции этого времени по ходу нагрева и контроля положения [25];

– выполнение независимой автономной оценки текущего температурного состояния каждой заготовки перед выдачей ее из печи на стан и передача информации на диспетчерский пост управления процессом прокатки [12];

– формирование величины соотношения газ – воздух при сжигании газообразного топлива с целью обеспечения максимально возможного теплового эффекта [27].

Структура информационного обеспечения энергосберегающего режима нагрева включает в себя ряд подсистем, совместная работа которых с локальными контурами управления обеспечивает формирование и реализацию энергосберегающего управления нагревом и контролем теплового состояния заготовок перед выгрузкой из нагревательной печи и подачи к прокатному стану. Структура информационной системы приведена на **рис. 1**.

Работа системы энергосберегающего управления основана на поддержании расчетной траектории нагрева заготовки, обеспечивающего минимизацию расхода топлива на нагрев с учетом действующих на процесс нагрева технологических и конструкционных ограничений. Пример расчета траектории оптимального управления нагревом с учетом ограничений показан на **рис. 2**. На **рис. 2** введены обозначения: 1 – ограничения не действуют; 2 – ограничение на максимальный перепад температуры по сечению нагреваемой заготовки; 3 – ограничение на управляющее воздействие; 4 – ограничение на температуру греющей среды; 5 – ограничение на температуру поверхности.

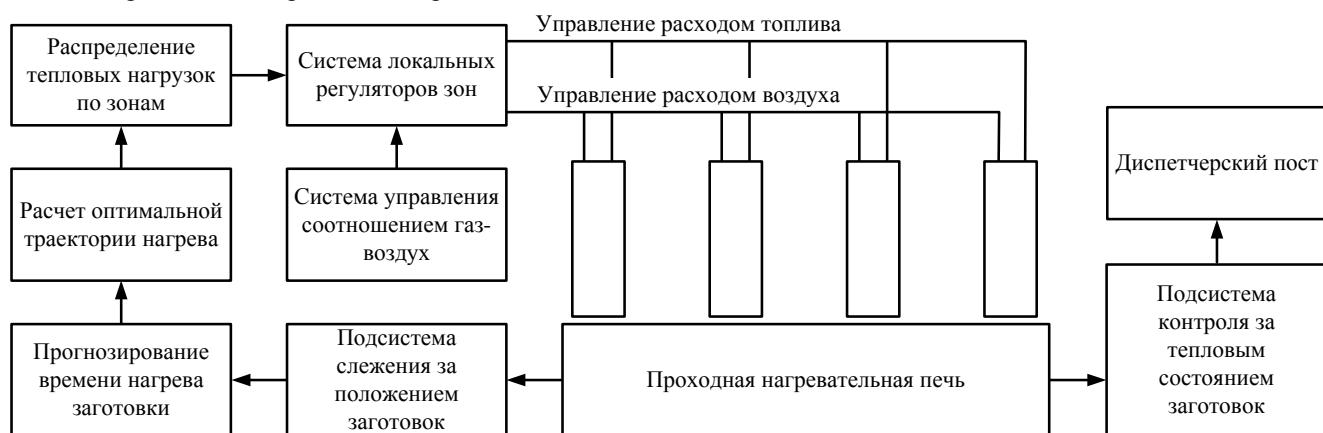


Рис. 1. Информационное обеспечение автоматизированной системы управления нагревом заготовок при использовании энергосберегающего режима

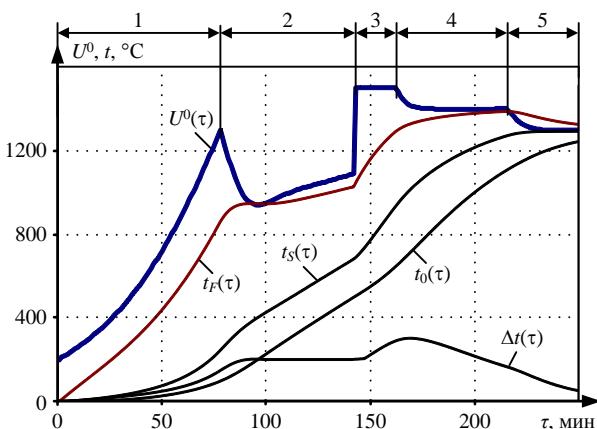


Рис. 2. Расчетные траектории нагрева при решении задачи оптимального с учетом действующих на процесс нагрева ограничений: U^0 – управляющее воздействие – характеристическая температура управления – $^{\circ}\text{C}$; t_F , t_S , t_0 , Δt – температура греющей среды, поверхности, центра заготовки и перепад температур по сечению соответственно, $^{\circ}\text{C}$

МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В АПК НА ОСНОВЕ МНОГОФАКТОРНОГО АНАЛИЗА И КЛАССИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОМАССООБМЕНА

Необходимость использования компьютерных технологий в комплексных работах, связанных с оценкой теплового состояния сталеплавильных ковшей во время внепечной обработки стали является одной из задач, поставленной на кафедре теплотехнических и энергетических систем в 2004 – 2005 годах. АПК является промежуточным звеном между агрегатом выплавки стали и машиной непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и работает в ритме крупного производственного цеха, таких как кислородно-конвертерный цех или электросталеплавильный цех ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Траектория движения ковша по цеху определяется химическим составом стали, времени, отведенного на ее обработку и загруженности агрегатов внепечной обработки. В производственных условиях возникают ситуации, в которых ни тепловое состояние, ни химический состав стали по объему ковша на момент начала обработки не известны. При этом неравномерность температурного поля расплава по массе достигает 40–50°C и данные локальных замеров разовой термопарой погружения не являются показательными для оценки среднемассовой температуры расплава. Это приводит к погрешностям в выполнении заданий по температуре и последующим проблемам при непрерывной разливке расплава на МНЛЗ. Для точного прогнозирования изменения температуры стали в ходе обработки на АПК необходимо определять статьи теплового баланса АПК в условиях, которые многие из этих статей невозможно корректно оценить. Так, например, невозможно точно определить тепловые потери через футеровку ковша и аккумуляцию тепла футеровкой во время обработки. Для устранения температурных градиентов по высоте расплава применяют перемешивание аргоном, подаваемым через пористые пробки в днище ковша, при этом эффективность продувки зависит не только от количества подведенного газа, но и от состояния пробок, наличия шлака на поверхности металла и его физического состояния. Так как эти характеристики невозможно измерить,

в условиях эксплуатации персонал для оценки качества перемешивания использует приблизительные оценки и терминологию «чечеткой логики» – «пробка дует хорошо/плохо», «перемешивание идет хорошо/плохо».

Анализ исследований, проведенных отечественными и зарубежными авторами, привел к пониманию невозможности создания универсальной модели, описывающей многообразие всех производственных процессов, и в итоге разработаны модели, алгоритмы и программный продукт, адаптируемый к условиям конкретного АПК на основе классических уравнений тепломассообмена и многофакторного анализа базы данных паспортов плавок по агрегату на длительном временном промежутке. С помощью программного продукта определяют тепловой баланс АПК на коротком периоде времени, среднемассовую температуру расплава, энергетические характеристики нагрева и обработки при различных исходных данных.

Модель выполнена в пакете Matlab в приложении Simulink, что определяет ее специфический интерфейс и особенности работы с ней (рис. 3).

Выполнение расчетов по разработанным алгоритмам выполняется средствами MS Excel и Simulink, сочетание которых позволяет выполнить решение любой задачи при моделировании теплового состояния тела.

Каждый из блоков, например блок расчета нагрева металла (рис. 4), выполняет комплекс локальных расчетов. В данном блоке исходными данными является количество тепла, затраченное на нагрев расплава, которое рассчитывается по формуле

$$Q_1 = (Q_2 + Q_3) - Q_4,$$

где Q_2 – суммарное количество тепла, полученное в результате нагрева электрической дугой и окисления электродов, Дж; Q_3 – тепловой эффект химических реакций, Дж; Q_4 – суммарные потери тепла, Дж.

Расчет температуры металла, которая пересчитывается каждую секунду, выполняется по формуле

$$t_i = t_{i-1} + \frac{Q_1}{c},$$

где t_{i-1} – температура расплава в предыдущий момент времени, в начале расчета температура равна приходной температуре металла, отраженной в паспорте плавки: $t_{01}=t_{pas}$; c – теплоемкость стали, Дж/кг·К.

В качестве примера организации отдельных блоков расчета приведен блок «Приход тепла от окисления электродов» (рис. 5).

В блоке рассчитывается приход тепла от окисления электродов в течение всех нагревов. При сгорании 1 кг графита выделяется 33520 кДж тепла, а расход электродов составляет 0,008 кг/кВт·ч затраченной на горение дуги электроэнергии. Во время работы электроударовой установки происходит окисление электродов с коэффициентом прихода тепла 0,074 Дж/Дж.

Расчет прихода тепла в каждый момент времени ведется по этому уравнению в зависимости от электрической мощности установки, связанной со степенью трансформатора, используемой при нагреве. На рис. 5 показана динамика изменения потока тепла при различных ступенях (столбцы). В результате расчета в окне «Приход тепла от окисления электродов» показывается суммарное количество тепла по этой статье прихода – за весь период обработки.

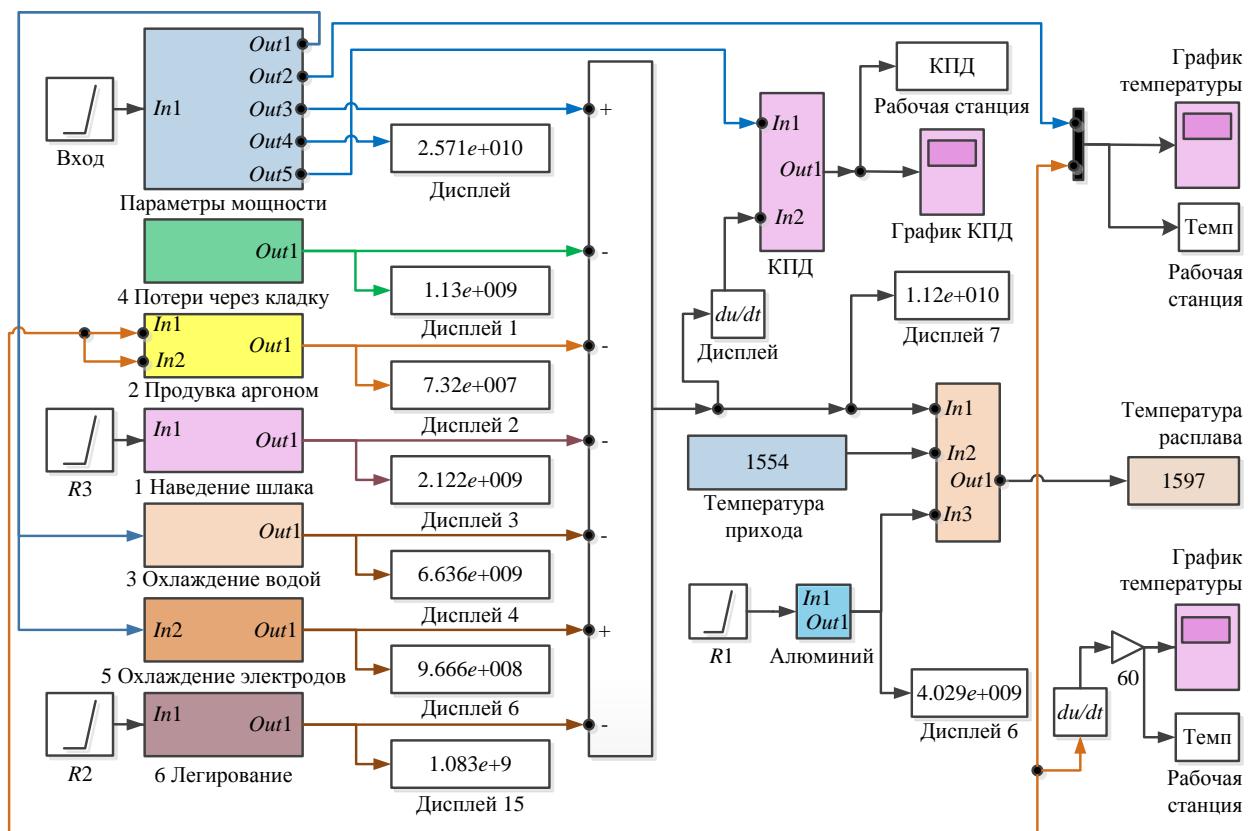


Рис. 3. Общий вид программы расчета теплового баланса АПК

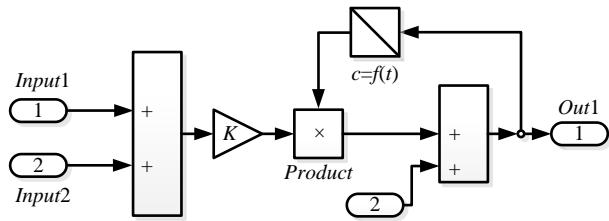
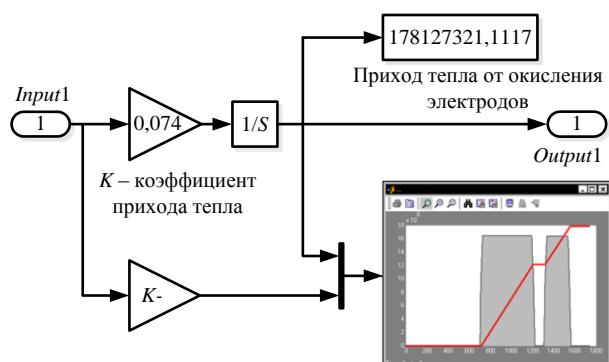

 Рис. 4. Схема блока «Нагрев металла»:
K=1/m, m – масса металла в ковше, кг


Рис. 5. Структура блока «Приход тепла от окисления электродов»

Использование программного продукта позволило оценить влияние эффективности нагрева расплава на разных этапах технологических операций, осуществляемых в АПК, и выдать рекомендации по совершенствованию технологии нагрева.

На выходе из блока отражается график температуры расплава и окно, в котором температура отражена в численном виде, рассчитанная в данный момент времени.

Количество факторов, влияющих на качество конечной продукции, может достигать 20, но все они имеют разное «весовое значение». Предварительно проведен анализ базы данных 20 тысяч паспортов плавок на АПК, который позволил оценить влияние этих факторов на процессы термодинамики, тепломассообмена и кинетики, и интегрировать результаты анализа в виде корректирующих коэффициентов в отдельные блоки программы.

Другим направлением исследования явилась оценка влияния интенсивности продувки на гидродинамику расплава и тепломассообмен. На основе результатов вычисленного эксперимента на основе моделирования разработаны режимы продувки с переменным изменением расхода аргона на пористые пробки, позволяющие количественно оценить эффективность перемешивания расплава и выравнивания температуры по массе. Результаты проведенных исследований реализованы в промышленные условия.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ
ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ БЕСКОНЕЧНЫХ ТЕЛ:
ПСЕВДО- И КВАЗИДИНАМИКА

Распространенность тепловых явлений в производственных процессах привело к поэтапному развитию математических моделей, целью которых является увеличение размерности, приводящее к повышению точности моделирования. Наиболее известными являются одномерные модели, содержащие одну пространственную координату, и двухмерные, содержащие две пространственные координаты. В работах Самойловича Ю.А. [14] доказано, что при соотношении геометрических размеров сечения 1:4 достаточно использовать одномерную математическую модель. Введем

понятия, определяющие характеристики указанных моделей:

– псевдодинамическая модель – это математическая модель, в которой происходит идеализация тепловых процессов и производится расчет температурного поля внутри отрезка по геометрической оси тела в различные моменты времени (рис. 6, 7);

– квазидинамическая модель – это математическая модель, в которой определение температурного поля производится внутри сечения в разные моменты времени (рис. 8).

Каждая из указанных псевдодинамических моделей имеет ряд допущений и ограничений, которые позволяют экономить вычислительные ресурсы и время расчета температурных полей. Каждый вычислительный эксперимент, проводимый с использованием указанных моделей, требует обоснования выбранной вычислительной схемы, сходимости вычислительных процессов [2, 12].

Однако, псевдодинамика математических моделей оставляет нерешенной проблему учета теплопереноса по длине бесконечно протяженного тела при изменении его объема. Для решения указанной проблемы и вводится понятие квазидинамической модели на третьем шаге эволюции. Этот шаг требует дискретного представления сплошного тела в виде множества дискретизированных тел конечного объема, которые изменяют свою координату вдоль оси аппликат. При этом образуется три взаимосвязанные упорядоченные

области Z_0 , Z_{+1} , Z_{-1} (рис. 8), каждая из этих областей определяет тепловое состояние фрагмента в текущий, предшествующий и последующий момент времени. Каждый элемент представляет собой цилиндр (в общем смысле геометрического понятия, рис. 8), из которых формируется полный объем тела. Для описания теплового состояния каждого объемного элемента используется уравнение теплопроводности для трех пространственных координат в заданный момент времени. Границные условия задаются для каждого i -го сегмента, составляющего объем всего тела (рис. 9). Границные условия задаются для каждой грани в соответствии с классической теорией теплопроводности, изложенной в [3, 5]. Для начального момента времени поле распределения температур задается на основе эмпирических данных, для каждого последующего момента времени по результатам расчета на предыдущем сегменте. Как правило, граница поверхности $A_{2i}A_{3i}B_{3i}B_{2i}$ является открытой и на это границе формируется граничное условие исходя из результатов расчета предыдущего шага.

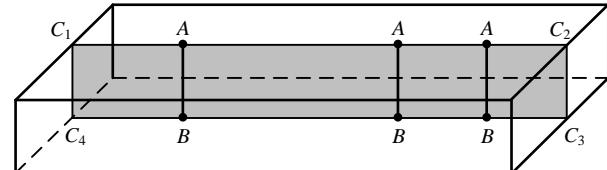


Рис. 6. Псевдодинамическая модель бесконечно протяженного тела

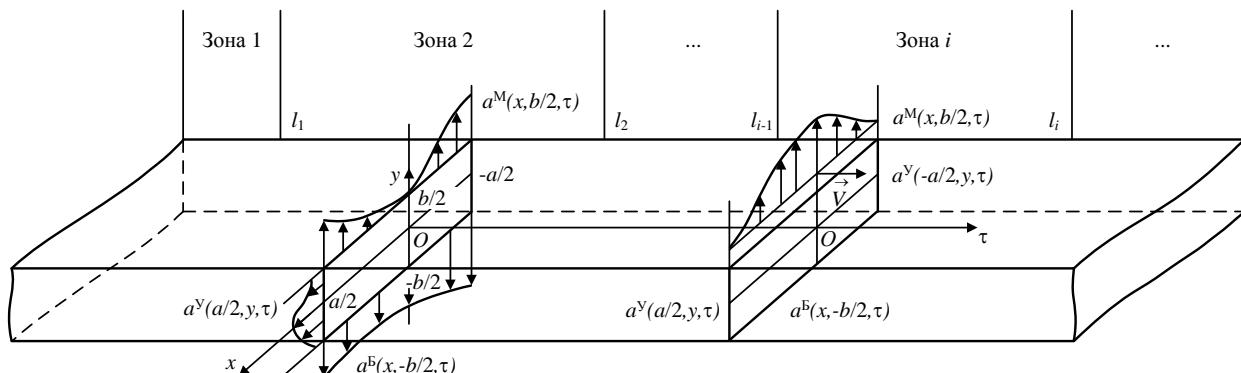


Рис. 7. Изменение положения сечения для обеспечения двухмерной псевдодинамики:

x, y – пространственные координаты для фиксированного сечения бесконечного тела, м; τ – временная координата, с;

V – скорость движения фиксированного сечения тела, м/с; a и b – геометрические размеры фиксированного сечения поперечного сечения тела, м; $\alpha(x, y, \tau)$ – значение коэффициента теплоотдачи с поверхности тела, Вт/(м²·°C); индексы M , Y – обозначение граней тела

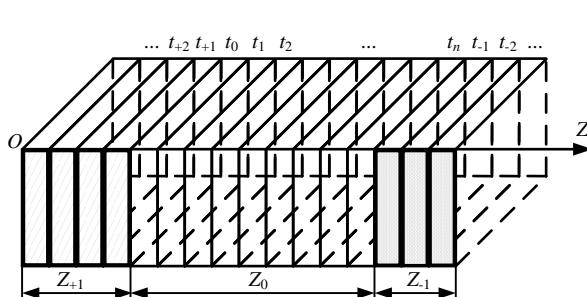


Рис. 8. Структура и схема перемещения фиксированного 3D-сечения бесконечно протяженного тела во времени

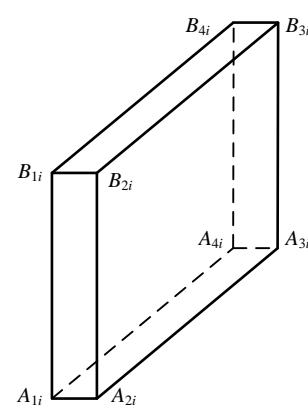


Рис. 9. Сегмент i -го слоя бесконечно протяженного тела

Таким образом, показано, что современные псевдо-динамические математические модели не позволяют выполнить моделирование теплового состояния тела при изменении его объема в динамике. Однако переход к квазидинамическим математическим моделям усложняет форму представления тела и вычислительные процессы, но приводит к более высокому приближению модели к реальному процессу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что тепловые процессы являются основополагающими и самыми распространенными в окружающем мире. На их основе описываются явления, протекающие при реализации металлургических переделов, таких как обработка стали в АПК, непрерывная разливка, нагрев заготовок в печах проходного типа, индукционный нагрев продукции метизной отрасли. Изучение этих процессов и прогнозирование их поведения наиболее рационально проводить по результатам математического моделирования, в основу которых положены классические основы тепло- и массопереноса.

2. Особенностью индукционного нагрева тел является сочетание и взаимодействие электромагнитных и тепловых процессов. Сложность математической модели требует использовать для ее реализации приближенные методы с использованием квадратурных формул.

3. При построении систем управления и разработки структуры информационного обеспечения для нагрева заготовок в методических печах проходного типа одной из важнейших частей становятся модули для расчета тепловых нагрузок, оптимальной траектории нагрева и прогнозирования теплового состояния заготовок.

4. Использование классических уравнений тепломассообмена и многофакторного анализа для моделирования процессов в АПК позволило построить систему прогнозирования теплового состояния расплава с использованием современных программных обеспечений MATLAB, Excel Link 2.0, MS Excel.

5. Математические модели до настоящего времени остаются единственным средством исследования в условиях высокой загрязненности и высоких температур рабочих пространствах металлургических агрегатов. Построение новых видов моделей, учитывающих динамику во времени свойств и объема исследуемых тел, позволило совершить третий шаг эволюции в моделировании, раскрывая безграничные возможности для исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Логунова О.С., Мацко И.И., Сафонов Д.С. Моделирование теплового состояния бесконечно протяженного тела с учетом динамически изменяющихся граничных условий третьего рода. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2012. № 27. С. 74-85.
2. Логунова О.С., Девятов Д.Х., Ячиков И.М. Математическое моделирование макроскопических параметров затвердевания непрерывных слитков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1997. №2. С. 49-51.
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М., 1952.
4. Лыков А. В. Тепло- и массообмен при фазовых и химических превращениях // Тепло- и массообмен в процес- сах испарения / отв. ред. А. В. Лыков. М.: Изд-во АН СССР, 1958. С. 7-14.
5. Борисов В.Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка. М.: Металлургия, 1987. 224 с.
6. Журавлев В.А., Колодкин В.М., Васькин В.В. Динамика двухфазной зоны металлических сплавов с химическими реакциями // Изв. АН СССР. Сер. Металлы. 1983. Т.4. №4. С. 64-68.
7. Шестаков А.Л., Свиридов Г.А. Новый подход к измерению динамически искаженного сигналов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2010. №16 (192), вып. 5. С. 116–120.
8. Белоусов М.Д., Шестаков А.Л. Метод самодиагностики термопреобразователя сопротивления в процессе работы // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2009. №3. С. 17–19.
9. Сафонов Д.С., Логунова О.С. Автоматизация проектирования конструкций секций вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №1. С. 110–125.
10. Сафонов Д.С., Логунова О.С. Структура интерактивной системы автоматизированного проектирования конструкции секций вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2014. № 2 (5). С. 75-81.
11. Тутарова В.Д., Сафонов Д.С. Выбор рациональной схемы расстановки форсунок в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2013. №1(3). С. 76-81.
12. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S. and etc. all Energy-saving optimal control over heating of continuous cast billets // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. DOI: 10.1007/s00170-015-6934-4.
13. Logunova O.S., Matsko I.I., Posohov I.A. and etc. all Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control processes // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 74. Iss. 9. Pp. 1407–1418.
14. Применение математических моделей для исследования процессов затвердевания и охлаждения непрерывных стальных слитков прямоугольного поперечного сечения / Самойлович Ю.А. и др. // Непрерывная разливка стали: сб. М.: Металлургия, 1974. 314 с.
15. Guseva E. N, Efimova I.Yu., Varfolomeeva T.N. Mocchan I.N. Discrete event simulation modelling of patient service management with Arena International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 // IOP Publishing IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1015 (2018). URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/3/032095/pdf>.
16. Гусева Е.Н. Методика преподавания дисциплины «Имитационное моделирование» у бакалавров прикладной информатики // Электротехнические системы и комплексы. 2015. №1(26). С. 48-51.
17. Гусева Е.Н., Варфоломеева Т.Н. Применение имитационных моделей для решения экономических задач оптимизации // Современные проблемы науки и образования. 2014. №6. С. 200-206.
18. Баранкова, И.И. Влияние индукционного способа нагрева на качество термообработки калиброванной стали в бунтах / И.И. Баранкова // Электрометаллургия. 2009. №3. С. 26-40.
19. Barankova I.I., Demidovich V.B., Sit'ko P.A. Increase in the Efficiency of Induction Heating during Heat Treatment of Wires // Russian Metallurgy (Metally). Vol. 2012. No. 6. Pp. 552–557.

20. Баракова И.И. Определение эффективного электрического сопротивления бунтов проволоки // Электричество. 2010. № 2. С. 79-84.
21. Баракова И.И., Коринченко Г.М. Определение теплофизических параметров анизотропных тел на основе решения обратных задач // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. №3. С. 35-39.
22. Оптимальные топливосберегающие режимы нагрева непрерывнолитых заготовок в методических печах / Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Жадинский Д.Ю. [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С.89-96.
23. Генкин А.Л., Власов С.А., Масальский Я.С. Возможности энергосберегающего управления листопрокатным комплексом // Автоматизация в промышленности. 2003. №3. С.44-47.
24. Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Система оптимального управления тепловым режимом промышленных печей // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С.18-29.
25. Андреев С.М. Прогнозирование времени нагрева заготовок в условиях нестационарного режима работы методических печей // Электротехнические системы и комплексы. 2017. №3(36). С. 35-39.
26. Zhu H., Wen Z., Wang X., Xu H., Tao S. Application of optimization technology for ratio of air to fuel combining feedforward with feedback in heating furnace // J Therm Sci. 2002. Vol. 11(3). Pp. 271–276.

Поступила в редакцию 18 марта 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

MATHEMATICAL MODELS FOR INVESTIGATION OF THE HEAT CONDITION OF OBJECTS AND HEAT PROCESSES CONTROL

Oksana S. Logunova

D.Sc. (Engineering), Professor, Director of the Institute, Civil Engineering, Architecture and Arts Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Logunova66@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>

Galina N. Chusavitina

Ph.D. (Pedagogics), Professor, Head of the Department, Department of Business Computing and IT, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: gn.chusavitina@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2468-7519>

Sergey M. Andreev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Department of Automated Control Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: andreev.asc@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0735-6723>

Evgeniy B. Agapitov

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Department of Heat and Power Engineering Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: jek_agapitov@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5643-4225>

Inna I. Barankova

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Department of Computer Science and Cyber security, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Inna_Barankova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6077-6164>

The purpose of the study is the systematization of problems related to the study of the thermal state of objects and melts in industrial production and ways to solve them. In particular, the problems characteristic for a metallurgical enterprise are: mathematical modeling of electromagnetic fields in systems for induction heating of the hardware industry; development of information support for an energy-saving mode of heating billets before rolling in a continuous-type heating furnace; application of the basis of the classical equations of heat and mass transfer and multivariate analysis to simulate the processes in the ladle furnace unit; development of pseudo-dynamic and quasidynamic models describing the thermal state of an infinitely extended object. All these tasks have a thermal nature and despite the difference in the objects of study, they use mathematical models to study the thermal state of objects and control thermal processes. The implementation of mathematical models is made using modern computer software. All studies were conducted by scientific schools of the Nosov Magnitogorsk State Technical

University and were extensively tested and implemented in operating production facilities.

Keywords: heat processes, mathematical model, control of heat processes, simulation modeling, thermal state of the object, melting facilities, pseudo- and quasi-dynamics.

REFERENCES

1. Logunova O.S., Matsko I.I., Safonov D.S. Simulation of thermal state of an infinite body taking into account dynamically changing boundary conditions of the third order. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematicheskoe modelirovaniye i programmirovaniye* [Bulletin of the South-Ural state University. Series: Mathematical simulation and programming]. 2012, no. 27, pp. 74-85. (In Russian)
2. Logunova O.S., Devyatov D.H., Yachikov I.M. Mathematical simulation of macroscopic parameters of hardening of continuously cast ingots. *Izvestiya vysshikh uchenykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of universities. Ferrous

- metallurgy]. 1997, no. 2, pp. 49-51. (In Russian)
3. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Thermal conductivity theory]. Moscow, 1952. (In Russian)
 4. Lykov A.V. Heat and mass transfer during phase and chemical transformations. *Teplo- i massoobmen v protsessakh ispareniya* [Heat and mass transfer in evaporation processes] / Editor-in-chief A.V. Lykov. M.: Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1958, pp. 7-14. (In Russian)
 5. Borisov V.T. *Teoriya dvukhfaznoy zony metallicheskogo slitka* [Theory of the two-phase region of metal ingot]. Moscow: Metallurgy, 1987. 224 p. (In Russian)
 6. Zhuravlev V.A., Kolodkin V.M., Vaskin V.V. Dynamics of the two-phase region of metal alloys with chemical reactions. *Izv. AN SSSR* [Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR]. Series. Metals. 1983, vol. 4, no. 4, pp. 64-68. (In Russian)
 7. Shestakov A.L., Sviriduk G.A. New approach to measuring of dynamically distorted signals. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie i programmirovaniye* [Bulletin of the South-Ural state university. Series: Mathematical simulation and programming]. 2010. no. 16(192), Issue 5. pp. 116-120. (In Russian)
 8. Belousov M.D., Shestakov A.L. Self-diagnostics test of the resistance temperature device during operation. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Kompyuternye tehnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of the South-Ural state university. Series: Computer technology, control, radio electronics]. 2009, no. 3, pp. 17-19. (In Russian)
 9. Safonov D.S., Logunova O.S. Computer-aided engineering of design of secondary cooling section of a continuous casting machine. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 1, pp. 110-125. (In Russian)
 10. Safonov D.S., Logunova O.S. Structure of the interactive system of computer-aided engineering of design of secondary cooling sections of a continuous casting machine. *Matematicheskoe i programmnoe obespechenie system v promyshlennoy i sotsialnoy sfere* [Mathematical software of systems in industry and social sphere]. 2014, no. 2(5), pp. 75-81. (In Russian)
 11. Tutarova V.D., Safonov D.S. Choice of the rational scheme of nozzle distribution in the secondary distribution zone of CCM. *Matematicheskoe i programmnoe obespechenie system v promyshlennoy i sotsialnoy sfere* [Mathematical software of systems in industry and social sphere]. 2013, no. 1 (3), pp. 76-81. (In Russian)
 12. Parsunkin, B.N., Andreev S.M., Logunova O.S. and etc. all Energy-saving optimal control over heating of continuous cast billets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. DOI: 10.1007/s00170-015-6934-4.
 13. Logunova O.S., Matsko I.I., Posohov I.A. and etc. all Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014, vol. 74, Iss. 9, pp. 1407-1418.
 14. Samoilovich Yu.A. Making use of mathematical models for investigation of processes of hardening and cooling of continuously cast steel rectangular billets. In the collection of scientific papers *Nepryeryvnaya razlivka stali* [Continuous casting of steel]. Mocsow: Metallurgy, 1974. 314 p. (In Russian)
 15. Guseva E.N., Efimova I.Yu., Varfolomeeva T.N. Mocchan I.N. Discrete event simulation modelling of patient service management with Arena International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018. IOP Publishing IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1015 (2018). URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/3/032095/pdf>
 16. Guseva E.N. Teaching methodology of "Simulation Modeling" course for bachelor students majoring in applied information science. *Elektrotehnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical systems and complexes]. 2015, no. 1 (26), pp. 48-51. (In Russian)
 17. Guseva E.N., Varfolomeeva T.N. Application of simulation models to solve optimization problems in economics. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Current problems of science and education]. 2014, no. 6, pp. 200-206. (In Russian)
 18. Barankova I.I. Influence of induction heating on the quality of heat treatment of calibrated steel in coils. *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy]. 2009, no. 3, pp. 26-40. (In Russian)
 19. Barankova I.I., Demidovich V.B., Sit'ko P.A. Increase in the Efficiency of Induction Heating during Heat Treatment of Wires. *Russian Metallurgy (Metally)*, vol. 2012, no. 6, pp. 552-557.
 20. Barankova I.I. Calculation of effective electrical resistance of wire coils. *Elektrичество* [Electricity], 2010, no. 2, pp. 79-84. (In Russian)
 21. Barankova I.I., Korinchenko G.M. Calculation of thermophysical parameters of anisotropic bodies on the basis of solution of inverse problems. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2009, no. 3, pp. 35-39. (In Russian)
 22. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Zhadinskiy D.Yu. and others. Optimum fuel-saving modes of heating continuously cast slabs in holding furnaces. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 89-96. (In Russian)
 23. Genkin A.L., Vlasov S.A., Masalskiy Ya.S. Feasibility of energy-saving control of a sheet rolling mill. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in industry]. 2003, no. 3, pp. 44-47. (In Russian)
 24. Andreev S.M., Parsunkin B.N. System of optimum control of thermal mode of industrial furnaces. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Machine building: network scientific journal]. 2013, no. 2, pp. 18-29. (In Russian)
 25. Andreev S.M. Forecasting of heating time of billets in terms of nonstationary operating mode of holding furnaces. *Elektrotehnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical systems and complexes]. 2017, no. 3(36), pp. 35-39. (In Russian)
 26. Zhu H., Wen Z., Wang X., Xu H., Tao S. Application of optimization technology for ratio of air to fuel combining feedforward with feedback in heating furnace. *J Therm Sci.* 2002, vol. 11(3), pp.271-276.

Логунова О.С., Агапитов Е.Б., Баранкова И.И., Андреев С.М., Чусавитина Г.Н. Математические модели для исследования теплового состояния тел и управления тепловыми процессами // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 2(43). С. 25-34. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-25-34](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-25-34)

Logunova O.S., Agapiov E.B., Barankova I.I., Andreev S.M., Chusavitina G.N. Mathematical Models for Investigation of the Heat Condition of Objects and Heat Processes Control. *Elektrotehnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 2(43), pp. 25-34. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-25-34](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-25-34)