

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 624.365

Вячеслав Викторович Бухмиров

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ теплотехники, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-76, e-mail: buhmirov@tot.ispu.ru

Муса Гусейнович Сулейманов

Электросетевая компания ООО «Р-СЕТЬ», специалист, Россия, Москва, e-mail: smusag@mail.ru

Евгений Николаевич Бушуев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой теоретических основ теплотехники, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-76, e-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

Ольга Борисовна Колибаба

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой энергетики теплотехнологий и газоснабжения, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-96-12, e-mail: koli-baba@mail.ru

Наталья Павловна Гусенкова

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-87, e-mail: zamdekana@iff.ispu.ru

Разработка современного метода расчета тепловой работы камерной нагревательной печи

Авторское резюме

Состояние вопроса. Поиск рациональных режимов нагрева на производственных предприятиях часто производится при помощи экспериментов. В отличие от экспериментальных методов, современные методы расчета используют математическое моделирование физико-химических процессов в нагревательных печах, которое позволяет сократить сроки исследовательских работ и является менее ресурсоемким процессом. Для поиска рациональных с точки зрения заданного критерия режимов работы термических печей предложена математическая модель, учитывающая пористость нагреваемого материала и протекание через него печной атмосферы.

Материалы и методы. Численная реализация модели осуществлена методом конечных разностей и зональным методом расчета сложного теплообмена.

Результаты. Разработана математическая модель тепловой работы термической печи для нагрева насыпных садов, учитывающая фильтрацию продуктов сгорания.

Выводы. Разработанная математическая модель предназначена для поиска новых режимов тепловой работы нагревательной печи, которые обеспечивают заданное качество конечного продукта при минимальном расходе топлива или максимальную производительность печи при заданном расходе топлива.

Ключевые слова: математическая модель, насыпная садка, термическая печь, метод сеток, зональные методы расчета радиационного теплообмена

Vyacheslav Viktorovich Bukhmirov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Theoretical Foundations of Heat Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-76, e-mail: buhmirov@tot.ispu.ru

Musa Husseinovich Suleimanov

Power grid company "R-SET" LLC, Specialist, Russia, Moscow, e-mail: smusag@mail.ru

Evgeniy Nikolayevich Bushuev

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Theoretical Foundations of Heat Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-76, e-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

Olga Borisovna Kolibaba

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Energy, Heat Technologies and Gas Supply Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-96-12, e-mail: koli-baba@mail.ru

Natalya Pavlovna Gusenkova

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Energy, Heat Technologies and Gas Supply Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-87, e-mail: zamdekana@iff.ispu.ru

Development of modern method to calculate thermal performance of chamber heating furnace

Abstract

Background. Experiments are often considered as the way to find rational heating modes at manufacturing enterprises. Unlike experimental methods, modern calculation methods use mathematical modeling of physical and chemical processes in heating furnaces. It allows to reduce the time of the research and it is less resource intensive. A mathematical model is proposed to find rational operation modes of thermal furnaces according to the specified criterion. The model considers the porosity of the heated material and the flow of the furnace atmosphere through it.

Materials and methods. Finite difference method and the zonal method to calculate complex heat transfer is used for numerical implementation of the model.

Results. A mathematical model of the thermal operation of a thermal furnace to heat bulk cages has been developed, considering the filtration of combustion products.

Conclusions. The developed mathematical model is designed to find new modes of thermal operation of the heating furnace, which provide a specified quality of the final product with a minimum fuel consumption or maximum furnace productivity according to the given fuel consumption rate.

Key words: mathematical model, bulk cage, thermal furnace, grid method, zonal methods to calculate radiative heat-exchange

DOI: 10.17588/2072-2672.2022.5.005-011

Введение. Вопросы повышения надежности и долговечности машин, приборов и тепло-технологических установок, включая и камерные садочные нагревательные печи, являются актуальными [1–5]. Решение этих проблем, прежде всего, связано с изменением свойств используемого металла при помощи термообработки. Термообработка является длительным и энергоемким процессом при производстве металлических изделий. Сокращение времени пребывания металла в печи (увеличения производительности теплотехнологической установки) при заданных параметрах качества нагрева металла позволит снизить удельные затраты энергоресурсов при получении готовой продукции.

Для выполнения данной задачи на машиностроительных предприятиях используют экспериментальные методы поиска рациональных режимов нагрева. Однако в условиях промышленного производства экспериментальные исследования являются достаточно дорогостоящими и ресурсоемкими, поэтому математическое моделирование получило весьма широкое распро-

странение для поиска режимов нагрева изделий, обеспечивающих заданное качество металла.

В [6] приведено описание математической модели камерной нагревательной печи, при разработке которой были приняты существенные, упрощающие задачу допущения. Внешняя задача теплообмена решена в нулевой постановке по классической формуле В.Н. Тимофеева [7], а задача внутреннего теплообмена решена для садки, которая представлена в виде тела простой формы и при допущении параболического распределения температур по сечению садки в конце нагрева. Такого рода допущения требуют корректировки настроечных коэффициентов при изменении конструкции печи и формы садки. Для устранения указанных допущений была разработана математическая модель тепловой работы камерной нагревательной термической печи, которая учитывает реальную геометрию садки, изменение радиационного потока по зонам печи и не использует допущения существования

квазистационарного режима теплопроводности в конце нагрева.

Методы исследования. Математическая модель тепловой работы камерной садочной нагревательной печи учитывает следующие факторы:

- сгорание топлива в подподовых топках с образованием дымовых газов, заполняющих рабочее пространство печи;
- радиационно-конвективный теплообмен между поверхностями футеровки и садки и продуктами сгорания топлива;
- перенос тепла теплопроводностью в футеровке в одномерной постановке задачи и лучисто-конвективную теплоотдачу от наружной поверхности печи в окружающую среду;
- перенос тепла теплопроводностью в трехмерной пористой садке.

Сложность моделирования работы нагревательных печей обусловлена нестационарностью тепловых процессов в рабочем пространстве, поэтому при моделировании были приняты следующие допущения:

- в период предварительного разогрева футеровки в рабочем пространстве выделена одна объемная зона, заполненная продуктами сгорания топлива;
- при расчете степени черноты дымовых газов предполагается отсутствие частиц сажи;
- все тела, участвующие в радиационном теплообмене, приняты серыми;
- поток конвективной теплоотдачи от продуктов сгорания к поверхностным зонам составляет постоянную долю от потока результирующего излучения.

Расчет сложного теплообмена во внутреннем пространстве печи выполнен упрощенным зональным методом [9], который предусматривает разбивку исследуемой системы на отдельные замкнутые подсистемы А и Б. Схема нагревательной печи и расчетные подсистемы представлены на рис. 1.

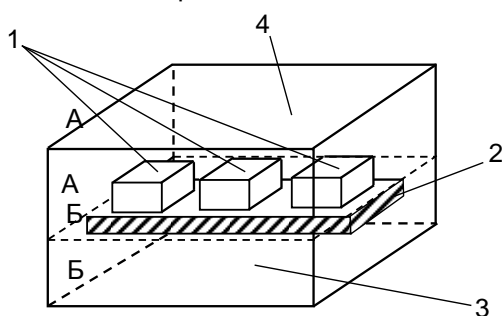


Рис. 1. Схема нагревательной печи: 1 – садка; 2 – под; 3 – подподовое пространство; 4 – рабочая зона печи; А и Б – расчетные подсистемы

Подсистемы образованы объемными зонами, которые ограничены реальными и воображаемыми абсолютно черными поверхностями, прилегающими к данной объемной зоне со стороны смежных с ней объемных зон. В расчете

внешнего теплообмена используются зоны III рода [11], для которых заданной является функциональная зависимость между температурой и результирующим тепловым потоком зоны.

Постановка и решение внутренней задачи теплообмена. Металлические изделия для термообработки помещают в контейнеры прямоугольной формы (рис. 2).

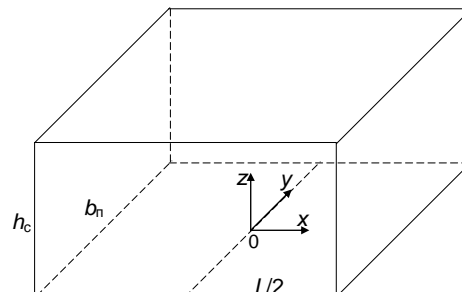


Рис. 2. Система координат для расчета температурного поля контейнера с насыпной садкой

Температурное поле насыпной садки $T(x, y, z, t)$ находили решением трехмерного нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности в декартовой системе координат:

$$c_c \rho_c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_c(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_c(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_c(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right], \quad (1)$$

где c_c – удельная теплоемкость насыпной садки, Дж/(кг·К); ρ_c – плотность садки, кг/м³; λ_c – коэффициент теплопроводности насыпной садки, Вт/(м·К).

Эффективные теплофизические свойства насыпных садок в зависимости от пористости определены экспериментально в [9]. Влияние фильтрации дымовых газов на величину коэффициента эффективной теплопроводности учтено при настройке математической модели печи.

Расчетная область выбрана исходя из условия симметрии и ограничена координатами $0 < x < L/2$, $0 < y < b_n/2$, $0 < z < h_c$, где L , b_n и h_c – геометрические размеры контейнера прямоугольной формы, в который помещен насыпной материал.

Начальное условие:

$$T(x, y, z, 0) = T_0. \quad (2)$$

В центральных плоскостях садки задано условие симметрии, а на внешних поверхностях садки – граничные условия II рода.

При $x = 0$ условие симметрии температурного поля относительно вертикальной плоскости имеет вид

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0. \quad (3)$$

Граничные условия на разных поверхностях садки имеют следующий вид:

– на торцевой поверхности садки (при $x = L/2$)

$$\lambda_c(T) \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L/2} = q_{x=L/2}; \quad (4)$$

– в центральной плоскости садки при $y = 0$ (условие симметрии температурного поля относительно вертикальной плоскости)

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = 0; \quad (5)$$

– на боковой поверхности садки, обращенной к стене (при $y = b_n/2$),

$$\lambda_c(T) \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=b_n/2} = q_{y=b_n/2}; \quad (6)$$

– на нижней поверхности садки (при $z = 0$)

$$-\lambda_c(T) \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = q_{z=0}; \quad (7)$$

– на верхней поверхности садки (при $z = h_c$)

$$\lambda_c(T) \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=h_c} = q_{z=h_c}, \quad (8)$$

где $\lambda_c(T)$ – эффективный коэффициент теплопроводности садки, Вт/(м·К); $q_{x=L/2}$, $q_{y=b_n/2}$, $q_{z=h_c}$ – плотности тепловых потоков, которые определяют решением внешней задачи теплообмена, Вт/м².

Система уравнений (1)–(8) решена методом конечных разностей при помощи специально разработанной вычислительной программы. Расчетная область покрыта сеткой с шагами $\Delta x = 0,5L/n_x$, $\Delta y = 0,5b_n/n_y$, $\Delta z = h_c/n_z$. Узлы сетки имеют координаты $x_i = i \cdot \Delta x$, $y_j = j \cdot \Delta y$, $z_m = m \cdot \Delta z$ ($i = 0 \dots n_x$, $j = 0 \dots n_y$, $m = 0 \dots n_z$). Введено дискретное время $t_k = k \cdot \Delta t$ ($k = 1, 2, \dots$) с шагом Δt . Решение трехмерного уравнения теплопроводности (1) выполнено с использованием метода расщепления [8, 10] и применения неявной разностной схемы при учете переноса тепла по каждому из трех координатных направлений.

Введем следующие обозначения:

T_{ijm}^{k-1} и T_{ijm}^k – сеточные значения температуры садки в узловых точках x_i , y_j , z_m в моменты времени t_{k-1} (в начале k -го шага) и t_k (в конце k -го шага) соответственно;

\hat{T}_{ijm} – температуры, по которым рассчитывают значения коэффициента теплопроводности садки и плотности внешних тепловых потоков (знак \wedge указывает на то, что соответствующая величина определяется при температуре \hat{T});

T'_{ijm} и T''_{ijm} – промежуточные значения температур, используемые при реализации метода расщепления.

Разностный аналог одномерной задачи теплопроводности, описывающей перенос теплоты вдоль оси x для каждого $j = 0 \dots n_y$, $m = 0 \dots n_z$, имеет следующий вид (индексы j и m опускаем):

– при $i = 1 \dots n_x - 1$

$$-f_i^- \cdot T'_{i-1} + \left[1 + (f_i^- + f_i^+) \right] \cdot T'_i - f_i^+ \cdot T'_{i+1} = T_i^{k-1}, \quad (9)$$

где f_i^+ и f_i^- – сеточные числа Фурье слева и справа от i -го узла:

$$f_i^- = \lambda_c \left(\frac{T_i^{k-1} + T_{i-1}^{k-1}}{2} \right) \Delta t / (c_c \rho_c \Delta x^2); \quad (10)$$

$$f_i^+ = \lambda_c \left(\frac{T_i^{k-1} + T_{i+1}^{k-1}}{2} \right) \Delta t / (c_c \rho_c \Delta x^2); \quad (11)$$

– при $i = 0$ (разностный аналог граничного условия (3))

$$(1 + 2 \cdot f_0^+) T'_0 - 2 \cdot f_0^+ T'_1 = T_0^{k-1} + 2 \cdot r_{\Delta x} \hat{q}_{x=0}; \quad (12)$$

– при $i = n_x$ (разностный аналог граничного условия (4))

$$(1 + 2 \cdot f_{n_x}^-) T'_{n_x} - 2 \cdot f_{n_x}^- T'_{n_x-1} = T_{n_x}^{k-1} + 2 \cdot r_{\Delta x} \hat{q}_{x=n_x}, \quad (13)$$

где $r_{\Delta x}$ – вспомогательный параметр, характеризующий степень влияния компоненты q_x на изменение температурного поля садки в течение шага по времени:

$$r_{\Delta x} = \Delta t / (c_c \rho_c \Delta x). \quad (14)$$

Разностные аналоги одномерной задачи теплопроводности, описывающей перенос тепла вдоль оси y и оси z , записывают аналогично.

Описанная выше система сеточных уравнений представляет собой разностный аналог задачи теплопроводности (1)–(8). Для ее решения на каждом шаге по времени применяется итерационная процедура, включающая в себя следующие этапы:

1. В первом приближении задается $\hat{T}_{ijm} = T_{ijm}^{k-1}$ ($i = 0 \dots n_x$, $j = 0 \dots n_y$, $m = 0 \dots n_z$).

2. Рассчитываются промежуточные значения температур T'_{ijm} , T''_{ijm} и сеточное значение температуры в конце шага по времени T_{ijm}^k .

3. Если максимальное отклонение найденных значений температур в конце шага по времени T_{ijm}^k от температур \hat{T}_{ijm} превышает заданную по условию погрешность расчета, присваиваем $\hat{T}_{ijm} = T_{ijm}^k$ ($i = 0 \dots n_x$, $j = 0 \dots n_y$, $m = 0 \dots n_z$) и расчет выполняется с п. 2.

4. Определяются средние температуры поверхностей садки $\bar{T}_{x=0}$, $\bar{T}_{x=L}$, $\bar{T}_{y=b_n/2}$, $\bar{T}_{z=0}$, $\bar{T}_{z=h_c}$, используемых при решении внешней задачи теплообмена.

В соответствии с принятыми допущениями, расчет температурного поля футеровки производится для отдельных участков:

- верхней части стен $T_{\phi 1A}$ ($j = 1$ в подсистеме А);
- верхней части заслонок $T_{\phi 2A}$ ($j = 2$ в подсистеме А);
- свода печи $T_{\phi 3A}$ ($j = 3$ в подсистеме А);

- свободной части пода $T_{\phi 1Б}$ ($j = 1$ в подсистеме Б);
- нижней части стен $T_{\phi 2Б}$ ($j = 2$ в подсистеме Б);
- нижней свободной части заслонок $T_{\phi 3Б}$ ($j = 3$ в подсистеме Б);
- части пода, закрытой садкой $T_{\phi 1С}$;
- нижней части заслонок, взаимодействующей с торцевыми поверхностями садки $T_{\phi 3С}$.

Постановка и решение задач теплопроводности в отдельных элементах футеровки производится аналогично решению задачи теплопроводности в садке с учетом принятых ранее допущений. Разностные аналоги граничных условий рассматриваются как уравнения теплового баланса с использованием соответствующих выражений для плотностей потоков результирующего излучения.

Постановка и решение внешней задачи теплообмена. Для расчета плотностей потоков результирующего излучения на поверхностях садки использован упрощенный зональный метод расчета радиационного теплообмена [11].

Для расчета плотностей потоков результирующего излучения на верхней и боковых поверхностях садки в рабочем пространстве печи выделено две области (рис. 1), каждая из которых образована объемной зоной и ограничивающими ее поверхностями:

- область (подсистема) А, заполненная продуктами сгорания ($j = 0$) и ограниченная верхней частью стен ($j = 1$) и заслонок ($j = 2$) в пространстве над садкой, сводом печи ($j = 3$), верхней поверхностью эквивалентной садки ($j = 4$) и условной горизонтальной абсолютно черной поверхностью ($j = 5$), отделяющей подсводовое пространство от промежутков между садкой и нижней частью стен;

- область (подсистема) В, заполненная продуктами сгорания ($j = 0$) и ограниченная свободной от садки поверхностью подины ($j = 1$), нижней частью стен ($j = 2$) и заслонок ($j = 3$), боковыми поверхностями садки ($j = 4$) и условной горизонтальной абсолютно черной поверхностью ($j = 5$), отделяющей область В от области А.

Расчет теплообмена в подсистемах А и В выполняется резольвентным зональным методом [9, 13], который позволяет установить связь потоков результирующего излучения и температур зон.

Расчет теплообмена в подсистеме А производится путем определения температур газа $T_{0А}$, верхних частей стен и заслонок $T_{1А}$ и $T_{2А}$ и свода $T_{3А}$ при фиксированных приближенных значениях зональной температуры верхней поверхности садки $T_{4А} = \bar{T}_{z=h_c}$ и эффективной температуры области В. Зональные уравнения относительно искомых температур $T_{0А}$, $T_{1А}$, $T_{2А}$, $T_{3А}$ имеют вид

$$\sum_{s=0}^5 a_{sj}^A \cdot T_{sA}^4 + \sum_{s=0}^5 h_{sj}^A T_{sA} + h_j^A = 0, \quad j = 0, 1, 2, 3, \quad (15)$$

где h_{sj}^A и h_j^A – балансовые коэффициенты для подсистемы А.

Расчет теплообмена в подсистеме В проводится путем определения температур газа $T_{0В}$, пода $T_{1В}$, нижних частей стен и заслонок $T_{2В}$ и $T_{3В}$ при фиксированных приближенных значениях зональной температуры боковых поверхностей садки $T_{4В} = \bar{T}_{y=b/2}$ и эффективной температуры области А. Зональные уравнения относительно искомых температур $T_{0В}$, $T_{1В}$, $T_{2В}$, $T_{3В}$ имеют вид

$$\sum_{s=0}^5 a_{sj}^B \cdot T_{sB}^4 + \sum_{s=0}^5 h_{sj}^B T_{sB} + h_j^B = 0, \quad j = 0, 1, 2, 3, \quad (16)$$

где h_{sj}^B и h_j^B – балансовые коэффициенты для подсистемы В.

Согласование результатов расчета в подсистемах А и В производится путем итерационного уточнения значений эффективных температур T_{AB} и T_{BA} по следующему алгоритму:

1. Задается исходное приближенное значение эффективной температуры T_{BA} .

2. При заданном значении T_{BA} производится расчет теплообмена в подсистеме А с определением потока результирующего излучения Q_{5A}^p по формуле

$$Q_{5A}^p = \sum_{s=0}^5 a_{s5}^A \cdot T_{sA}^4. \quad (17)$$

Рассчитывается эффективная температура T_{AB} :

$$T_{AB} = \sqrt[4]{T_{BA}^4 + Q_{5A}^p / (\sigma_0 F_{5A})}. \quad (18)$$

3. При найденном значении T_{AB} производится расчет теплообмена в подсистеме В с определением потока результирующего излучения Q_{5B}^p по формуле

$$Q_{5B}^p = \sum_{s=0}^5 a_{s5}^B \cdot T_{sB}^4. \quad (19)$$

Уточняется значения эффективной температуры T_{BA} :

$$T_{BA} = \sqrt[4]{T_{AB}^4 + Q_{5B}^p / (\sigma_0 F_{5B})}. \quad (20)$$

4. Рассчитывается модуль разности между предыдущим и последующим приближением эффективной температуры $|T_{BA}' - T_{BA}|$. При необходимости продолжения итерационного процесса осуществляется возврат к п. 2.

При достижении заданной точности эффективной температуры рассчитываются зональные значения плотностей потоков результирующего излучения:

– на верхней поверхности эквивалентной садки

$$q_{z=h_c} \equiv q_{4A}^p = \frac{1}{F_{4A}} \sum_{s=0}^5 a_{s5}^B \cdot T_{sA}^4; \quad (21)$$

– на боковых поверхностях эквивалентной садки

$$q_{y=b/2} \equiv q_{4B}^p = Q_{5B}^p = \frac{1}{F_{4B}} \sum_{s=0}^5 a_{s4}^B \cdot T_{sB}^4. \quad (22)$$

Уравнение, определяющее перенос тепла в пространстве между нижней и торцевыми поверхностями эквивалентной садки и подом печи, имеет общий вид

$$\sigma_0 / (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1) (T_1^4 - T_2^4) - h_{11} T_1 + h_1 = 0, \quad (23)$$

где индексы 1 и 2 обозначают поверхности футеровки и садки соответственно; ε_1 и ε_2 – степени черноты; h_{11} и h_1 – балансовые коэффициенты.

Решение сопряженной задачи теплообмена. Согласование решений внешней и внутренних задач для садки и футеровки на каждом шаге по времени производится в следующем порядке:

1. Решением системы разностных уравнений для отдельных участков футеровки определяются прогоночные и балансовые коэффициенты.

2. Начальные приближения средних температур поверхностей эквивалентной садки приравниваются к значениям этих температур в начале шага по времени.

3. Решением внешней задачи теплообмена (15)–(17), (19) определяются зональные значения плотностей потоков результирующего излучения на поверхностях садки.

4. При найденных значениях плотностей потоков результирующего излучения производится расчет нагрева садки путем решения системы разностных уравнений (9)–(14) с определением средних температур поверхностей садки в конце шага по времени.

5. Если полученные значения средних температур поверхностей садки в конце шага по времени значительно отличаются от использованных при решении внешней задачи, то пп. 3 и 4 алгоритма повторяют.

6. Обратной прогонкой завершается решение системы разностных уравнений с определением температур в футеровке в конце каждого шага по времени.

Заметим, что математическая модель тепловой работы камерной нагревательной печи предусматривает возможность учета в расчетах предварительно разогретой футеровки.

Программа теплового режима камерной печи. Математическая модель реализована в виде программы для расчета режимов тепловой работы садочных газовых нагревательных печей RNP в среде Turbo Delphi 2006.

Компьютерная программа состоит из трех расчетных и двух вспомогательных блоков. Расчетные блоки – блоки решения внутренней,

внешней и сопряженной задач теплообмена. К вспомогательным блокам отнесены блок расчета горения топлива и блок расчета геометрических угловых коэффициентов излучения.

Главное меню после запуска программы содержит два доступных раздела: «Режим» и «Выход». Исходные данные для расчета необходимо ввести в пункте меню «Режим», вкладке «Параметры». После ввода исходных данных расчет начинают нажатием кнопки «Расчет» в меню программы.

Результаты расчета выводятся в виде графиков изменения во времени температуры в заданных точках садки и температуры газа в рабочем пространстве печи. Предусмотрена возможность вывода в области графика исходных данных и результатов расчета в текстовом виде.

Результаты исследования. Адекватность математического моделирования проверена сопоставлением температурного поля садки с экспериментальными данными О.Б. Крыловой [12]. Результаты сравнительного анализа данных расчета и опытных данных показаны на рис. 3.

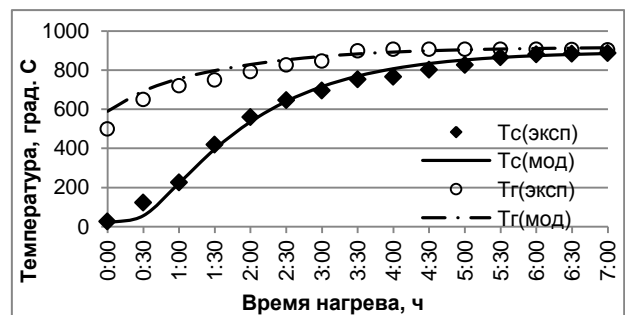


Рис. 3. Температуры садки и газа: T_c – температура на нижней поверхности садки; T_g – температура газа в рабочем пространстве

Анализ полученных данных (рис. 3) позволяет сделать вывод об удовлетворительном совпадении температурных полей, полученных на разработанной математической модели и опытным путем. Средняя относительная погрешность расчета температур не превышает 12 %.

Выполняя вычислительный эксперимент путем сканирования вариантов при помощи разработанной математической модели тепловой работы садочной термической печи можно достичь заданного по технологии качества металла в конце термообработки, изменяя интенсивность внешнего теплообмена и продолжительность нагрева/выдержки. Численная математическая модель позволяет также контролировать и скорость изменения температурного поля садки. Экономический эффект заключается в корректировке существующих технологических режимных карт термообработки насыпных изделий и может быть рассчитан для каждого конкретного предприятия в отдельности.

Выводы. Разработанная математическая модель тепловой работы нагревательной садочной печи периодического действия на основе современных методов математического описания внутреннего и внешнего теплообмена, реализованная в виде вычислительной программы в среде Turbo Delphi 2006, позволяет проводить поиск режима нагрева, обеспечивающего заданное качество продукта при минимальных энергетических затратах. Адекватность математической модели проверена путем сравнения данных эксперимента с данными расчета. Среднее отклонение расчетных значений от эксперимента не превышает 12 %.

Список литературы

1. **Нагрев** стальных слябов / В.Н. Перетяtko, Н.В. Темлянец, М.В. Темлянец, Ю.Е. Михайленко. – М.: Теплотехник, 2008. – 192 с.
2. **Трубаев П.А., Кузнецов В.А., Беседин П.В.** Методы компьютерного моделирования горения и теплообмена во вращающихся печах. – Белгород: Изд-во БГТУ: БИЭИ, 2008. – 230 с.
3. **Бровкин Л.А.** Температурные поля тел при нагреве и плавлении в промышленных печах. – Иваново, 1973. – 364 с.
4. **Мастрюков Б.С., Сборщиков Г.С.** Теплофизика металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1993. – 320 с.
5. **Бакластов А.М., Горбенко В.А., Данилов О.Л.** Промышленные тепломассообменные процессы и установки / под ред. А.М. Бакластова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 328 с.
6. **Колибаба О.Б., Бухмиров В.В., Сулейманов М.Г.** Математическая модель оптимизации работы термической печи для нагрева насыпных садок // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 1. – С. 21–24.
7. **Телегин А.С., Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г.** Тепломассоперенос. – М.: Академкнига, 2002. – 455 с.
8. **Маковский В.А., Лаврентик И.И.** Алгоритмы управления нагревательными печами. – М.: Металлургия, 1977. – 183 с.
9. **Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н.** Теплообмен излучением: справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.
10. **Годунов С.К., Рябенский В.С.** Разностные схемы. – М.: Наука, 1977. – 440 с.
11. **Бухмиров В.В., Крупенников С.А.** Упрощенный зональный метод расчета радиационного теплообмена в излучающей и поглощающей среде // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1999. – № 1. – С. 68–70
12. **Крылова О.Б.** Совершенствование режимов работы термических печей для нагрева насыпных садок: дис. ... канд. техн. наук. – Ленинград, 1988. – 185 с.
13. **Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А.** Математическое моделирование промышленных печей. – М.: Металлургия, 1990. – 239 с.
14. **Сулейманов М.Г., Бухмиров В.В.** Исследование влияния пористости и типа контейнера на температурное поле нагреваемых садок // Вестник ИГЭУ. – 2017. – Вып. 5. – С. 5–10.

References

1. Peretyat'ko, V.N., Temlyantsev, N.V., Temlyantsev, M.V., Mikhaylenko, Yu.E. *Nagrev stal'nykh slyabov* [Heating of steel slabs]. Moscow: Teplotekhnika, 2008. 192 p.
2. Trubaev, P.A., Kuznetsov, V.A., Besedin, P.V. *Metody komp'yuternogo modelirovaniya goreniya i teploobmena vo vrashchayushchikhsya pechakh* [Methods of computer simulation of combustion and heat transfer in rotary furnace]. Belgorod: Izdatel'stvo BGTU: BIEI, 2008. 230 p.
3. Brovkin, L.A. *Temperaturnye polya tel pri nagreve i plavlenii v promyshlennyykh pechakh* [Temperature fields of bodies during heating and melting in industrial furnaces]. Ivanovo, 1973. 364 p.
4. Mastryukov, B.S., Sborshchikov, G.S. *Teplofizika metallurgicheskikh protsessov* [Thermophysics of metallurgical processes]. Moscow: Metallurgiya, 1993. 320 p.
5. Baklastov, A.M., Gorbenko, V.A., Danilov, O.L. *Promyshlennyye teplomassoobmennyye protsessy i ustanovki* [Industrial heat and mass transfer processes and installations]. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 328 p.
6. Kolibaba, O.B., Bukhmirov, V.V., Suleymanov, M.G. *Matematicheskaya model' optimizatsii raboty termicheskoy pechi dlya nagreva nasypanykh sadok* [Mathematical model to optimize operation of thermal furnace for heating bulk cages]. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 1, pp. 21–24.
7. Telegin, A.S., Shvydkiy, V.S., Yaroshenko, Yu.G. *Tplomassoperenos* [Heat and mass transfer]. Moscow: Akademkniga, 2002. 455 p.
8. Makovskiy, V.A., Lavrentik, I.I. *Algoritmy upravleniya nagrevatel'nyimi pechami* [Algorithms to control heating furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1977. 183 p.
9. Blokh, A.G., Zhuravlev, Yu.A., Ryzhkov, L.N. *Tploobmen izlucheniem: spravochnik* [Heat transfer through radiation: handbook]. Moscow: Energoatomizdat, 1991. 432 p.
10. Godunov, S.K., Ryaben'kiy, V.S. *Raznostnyye skhemy* [Difference schemes]. Moscow: Nauka, 1977. 440 p.
11. Bukhmirov, V.V., Krupenniko, S.A. *Uproshchennyy zonal'nyy metod rascheta radiatsionnogo teploobmena v izluchayushchey i pogloshchayushchey srede* [Simplified zonal method to calculate radiative heat transfer in radiating and absorbing medium]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 1999, no. 1, pp. 68–70.
12. Krylova, O.B. *Sovershenstvovanie rezhimov raboty termicheskikh pechey dlya nagreva nasypanykh sadok: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improvement of operation modes of thermal furnaces for heating bulk cages: Cand. tech. sci. diss.]. Leningrad, 1988. 185 p.
13. Arutyunov, V.A., Bukhmirov, V.V., Krupennikov, S.A. *Matematicheskoe modelirovanie promyshlennyykh pechey* [Mathematical modeling of industrial furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1990. 239 p.
14. Suleymanov, M.G., Bukhmirov, V.V. *Issledovanie vliyaniya poristosti i tipa konteynera na temperaturnoe pole nagrevaemykh sadok* [Study of effect of porosity and container type on the temperature field of heated cages]. *Vestnik IGEU*, 2017, issue 5, pp. 5–10.