

М. П. Ревун, профессор, д.т.н.
Ю. Н. Каюков, ассистент
А. И. Чепрасов, профессор, к.т.н.
В. И. Иванов, ст. преподаватель

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА МЕТАЛЛА В ПЛАМЕННОЙ ПЕЧИ КАМЕРНОГО ТИПА

(Сообщение 1)

Запорожская государственная инженерная академия

Розглянуто математичну модель нагрівання сталевих заготовок у камерній печі відкритого полум'я. Задачу теплообміну в робочому просторі даної печі вирішено за допомогою зонального методу з урахуванням наявності факела, руху гріючого середовища, втрат теплоти, що акумулюється кладкою, а також втрат теплоти до навколишнього середовища через огороження зовнішньої поверхні печі.

Рассмотрена математическая модель нагрева стальных заготовок в камерной печи открытого пламени. Задача теплообмена в рабочем пространстве данной печи решена при помощи зонального метода с учетом наличия факела, движения греющей среды, потерь теплоты, аккумулируемой кладкой, а также потерь теплоты в окружающую среду через ограждение наружной поверхности печи.

Введение. Актуальной задачей проектирования новых и реконструкции действующих газовых нагревательных печей является достижение высокой равномерности нагрева, которую оценивают величиной допустимого перепада температуры на поверхности и в поперечном сечении нагреваемых заготовок в момент выдачи из печи. Наибольшие сложности решения данной задачи имеют место для камерных пламенных печей [1], сжигание топлива в которых способствует формированию неравномерного распределения температуры в газовом объеме камеры и, как следствие, к неравномерности тепловых потоков на поверхности нагреваемого металла. В этой связи создание условий равномерного нагрева металла во многом определяется выбором рационального способа сжигания топлива и конструкции системы отопления.

На ОАО «Электрометаллургический завод «Днепропеталь» для нагрева слитков и заготовок перед ковкой используют двухкамерные печи с площадью пода 29 м^2 . Каждая камера оборудована независимыми системами отопления и отвода продуктов сгорания. Система отопления состоит из восьми горелочных устройств, установленных на одной боковой стенке камеры в два ряда по ее высоте: четыре горелки типа ГНП-5 образуют верхнюю и четыре горелки типа ГНП-3 – нижнюю зоны отопления. Расход природного газа (теплота сгорания $35,6 \text{ МДж/м}^3$) регулируют независимой системой автоматического управления, которая в комплекте с термоэлектрическим термометром, установленном в подвесном своде, обеспечивает в каждой камере заданный уровень температуры. Продукты сгорания удаляют через окна, равномерно расположенные вдоль боковых стен. Воздух, подаваемый на горение топлива, подогревают в петлевом рекуператоре, установленном в дымовом борове.

Наличие верхней и нижней зон отопления обеспечивает двухсторонний подвод теплоты к заготовкам, расположенным на подовых брусках, однако при факельном сжигании топлива одностороннее боковое отопление не способствует достижению условий равномерного нагрева металла, расположенного в направлении движения

греющей среды.

Постановка задачи. Целью данных исследований является анализ влияния различных параметров факела на основные характеристики теплообмена в камерной нагревательной печи и оценка влияния системы отопления печи на равномерность нагрева металла и его теплоусвоение.

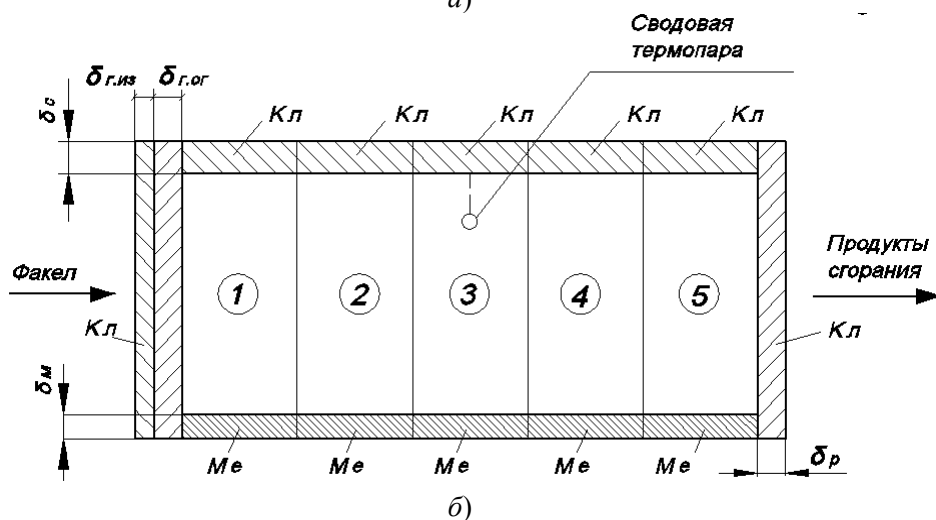
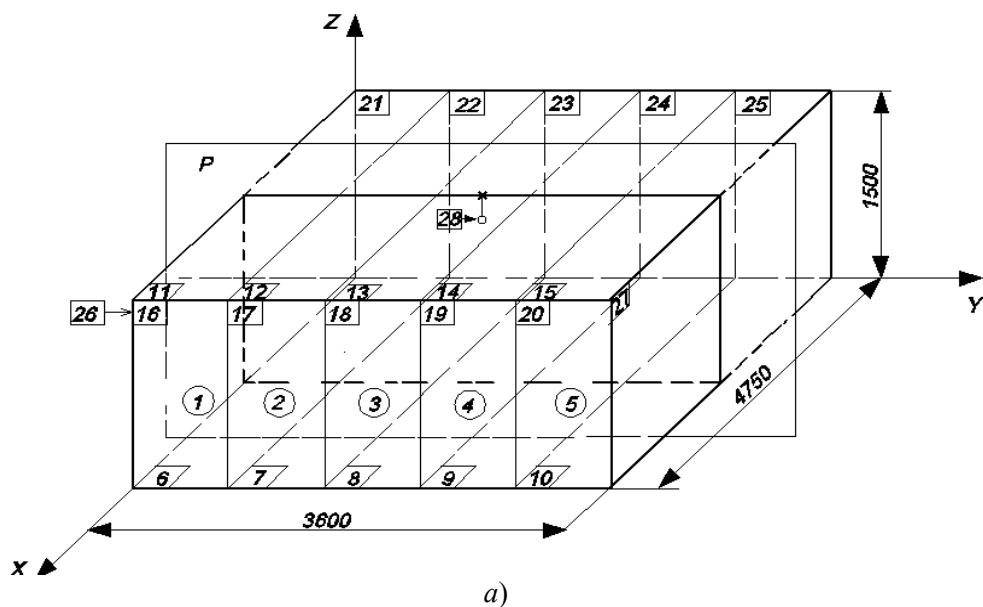
Основная часть исследований. Для анализа зависимости равномерности нагрева металла от режимных параметров работы двухкамерной нагревательной печи в целом и ее системы отопления в частности разработана математическая модель, предусматривающая расчет в дискретном времени распределения температуры по толщине заготовки в зависимости от места ее расположения в рабочей камере печи. При этом на каждом шаге по времени производят:

- решение внешней задачи теплообмена (расчет радиационного теплообмена между продуктами сгорания топлива и поверхностями нагреваемых заготовок и футеровки при наличии факела и движения греющей среды);
- решение внутренней задачи теплообмена для нагреваемых заготовок и футеровки печи;
- решение сопряженной задачи теплообмена.

Задача внешнего теплообмена. Задачу внешнего теплообмена решают зональным методом [2,3] при следующих допущениях:

- заготовки нагреваемого металла прямоугольного сечения уложены на подовые брусья в один слой без зазоров, что позволяет представить садку металла в виде пластины с толщиной равной толщине заготовки, расположенной на уровне подовых брусьев;
- наличие верхней и нижней зон отопления обеспечивает симметричный по толщине садки заготовок нагрев металла;
- термоэлектрический термометр представляет собой двухслойный шар (внешний слой выполнен из алунда, внутренняя полость заполнена металлом рабочего спая датчика);
- тела, участвующие в лучистом теплообмене (металл, кладка, термоэлектрический термометр, продукты сгорания) являются серыми, а излучение и отражение лучистой энергии поверхностями металла, кладки и термоэлектрического термометра – диффузным.

С учетом принятых допущений зональная модель теплообмена в рабочем пространстве пламенной двухкамерной печи (рис. 1) представлена замкнутой системой, образованной твердыми непрозрачными телами, разделенными поглощающе-излучающей средой. Данная система (рис 1,а) имеет вид параллелепипеда с размерами, соответствующими размерам верхней части рабочего пространства печной камеры (длина – 4,75 м, ширина – 3,60 м, высота – 1,50 м). Для учета изменения состава продуктов сгорания и оптических свойств поглощающе-излучающей среды в направлении развития факела вышеуказанную систему разделяли на пять равных участков, что позволяет представить зональную модель внешнего теплообмена, состоящей из двадцати восьми зон, в том числе пяти объемных зон факела и продуктов сгорания ($I = 1 \dots 5$), пяти плоских поверхностных зон металла ($I = 6 \dots 10$), семнадцати плоских поверхностных зон кладки ($I = 11 \dots 27$) и одной сферической поверхностной зоны, соответствующей сводовому термоэлектрическому термометру ($I = 28$).



Ме - объемные зоны металла; Кл - объемные зоны кладки; δ - толщина объемных зон металла и кладки, соответствующих элементов ограждения печной камеры; цифры в кругах - номера объемных газовых зон; цифры в прямоугольниках - номера поверхностных зон металла, кладки и термоэлектрического термометра

Рисунок 1 – Схема зональной модели теплообмена в рабочей камере двухкамерной нагревательной печи (а), сечение рабочего пространства печной камеры в плоскости P (б):

Факел и продукты сгорания равномерно по высоте заполняют рассматриваемую часть рабочего пространства (рис. 1,б), двигаются от горелочных устройств (поверхностная зона $I = 26$) через объемные зоны ($I = 1 \dots 5$) в дымовые окна, равномерно расположенные в разделительной стенке печи (поверхностная зона $I = 27$).

Расчет полной длины факела в зависимости от изменения тепловой нагрузки печи производят в соответствии с рекомендациями работы [4] и учетом соотношения [5,6] в виде:

$$l_i \approx 0,7 \cdot l_\delta, \quad (1)$$

где l_n – длина подсоса (расстояние от горелочного устройства до сечения на оси факела, где в зону горения подсасывается все количество воздуха, теоретически необходимого для горения топлива, и степень его выгорания составляет 0,85); l_ϕ – длина факела (расстояние от выхода из горелочного устройства до сечения на его оси, где

величина среднего химического недожога топлива составляет $q_3 = 2\%$).

Концентрацию топлива, степень его выгорания, подсос воздуха в зону горения, а также концентрации излучающих компонентов продуктов сгорания по длине факела, рассчитывают по соотношениям [6]:

$$C_y^m = \exp[-M \cdot y^2]; \quad (2)$$

$$\chi_y = 1 - \exp[-M \cdot y^2]; \quad (3)$$

$$\alpha_y = \alpha_0 \cdot |1 - \exp[-M \cdot N \cdot y]|; \quad (4)$$

$$C_y = \frac{\chi_y \cdot V_0}{\chi_y \cdot V_0 + (1 - \chi_y) + (\alpha_y - \chi_y) \cdot L_0} \cdot C_{n.z.}, \quad (5)$$

где y – расстояние вдоль оси факела; C_y^m – концентрация топлива в факеле на длине y ; χ_y – степень выгорания топлива в факеле на длине y ; α_y – коэффициент расхода воздуха в зоне горения на расстоянии y от среза сопел горелочных устройств; α_0 – коэффициент расхода воздуха, подаваемого на горение; M – коэффициент, полученный из условия: при $y = \ell_\phi$ степень выгорания топлива $\chi_y = 0,98$; N – коэффициент, рассчитываемый по уравнениям (3) и (4) при $y = \ell_n$, то есть $\alpha_y = 1,0$, и степени выгорания топлива $\chi_y = 0,85$; $C_{n.z.}$ – концентрация соответствующего излучающего компонента (CO_2 , H_2O) в продуктах полного сгорания при $\alpha = 1,0$; V_0 – объем продуктов полного сгорания при $\alpha = 1,0$; L_0 – количество воздуха, теоретически необходимого для горения топлива.

В соответствии с работой [3] в пределах каждой поверхностной зоны ($I = 6 \dots 28$), имеющей площадь F_I , абсолютную температуру T_I и степень черноты ε_I принимают постоянными. В пределах каждой объемной газовой зоны ($I = 1 \dots 5$), имеющей объем V_I и ограниченной воображаемой поверхностью F_I , принимают постоянными абсолютную температуру газовой среды T_I и концентрацию ее поглощающе-излучающих компонентов (CO_2 , H_2O). Объемное излучение газовой среды заменяют эквивалентным диффузным излучением воображаемой поверхности F_I , имеющей температуру T_I и степень черноты ε_I равную степени черноты объемной зоны, которую для случая серого газа определяют как

$$\varepsilon_I = 1 - \exp\left\{-k_I \cdot S_I^{\varepsilon\phi}\right\}, \quad (6)$$

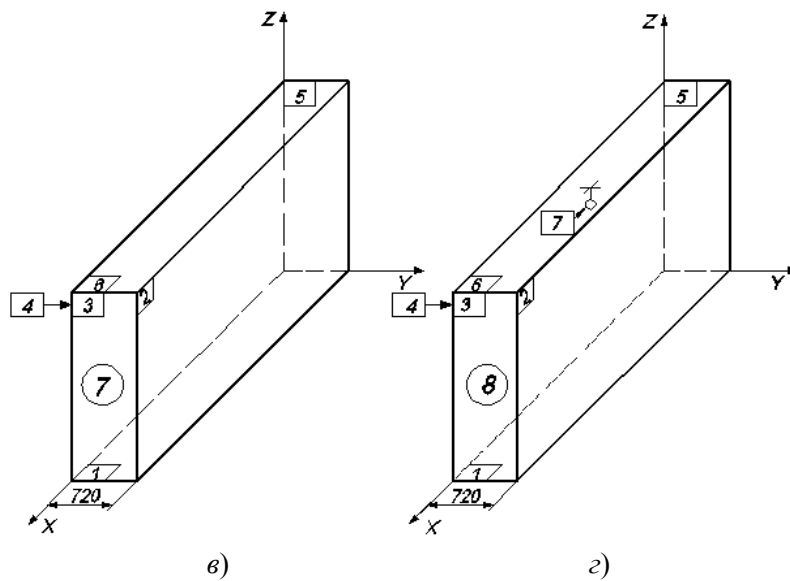
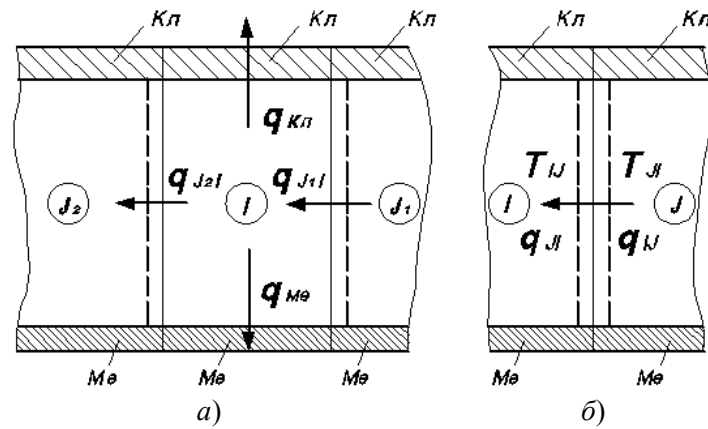
где $S_I^{\varepsilon\phi}$ – эффективная длина пути луча для I -той объемной газовой зоны; $S_I^{\varepsilon\phi} = \frac{4 \cdot V_I}{F_I}$;

k_I – коэффициент поглощения в пределах I -той объемной газовой зоны.

Коэффициент поглощения в пределах I -той объемной газовой зоны определили по соотношению [7]

$$k_I = \left[\frac{0,78 + 0,016(H_2O)_I^{cp}}{\sqrt{0,01[(CO_2)_I^{cp} + (H_2O)_I^{cp}] \cdot S_I^{\varepsilon\phi}}} - 0,1 \right] \cdot \left(1 - \frac{0,37t_I}{1000} \right) \cdot 0,01 \cdot [(CO_2)_I^{cp} + (H_2O)_I^{cp}], \quad (7)$$

где $(CO_2)_I^{cp}$, $(H_2O)_I^{cp}$ – средние концентрации диоксида углерода и водяных паров в I -той объемной газовой зоне; t_I – температура I -той объемной газовой зоны.



Me - объемные зоны металла; *Кл* - объемные зоны кладки;
 --- - условные поверхности

Рисунок 2 – Схема теплообмена в *I*-ой подсистеме (а), схема взаимодействия смежных подсистем (б), подсистема без термоэлектрического термометра (в), подсистема с термоэлектрическим термометром (з):

Наряду с реальными поверхностными зонами металла и кладки в соответствии с работой [8] вводят условные абсолютно черные поверхности, которые отделяют *I*-тую объемную зону от смежных с ней *J*-тых объемных зон (рис. 2,а). Условные поверхности прилегают к рассматриваемой объемной зоне со стороны смежных объемных зон, пропускают все падающее на них излучение, которое рассматривают далее, как собственное диффузное. Такое допущение позволяет представить зональную модель теплообмена (рис. 1), состоящей из отдельных подсистем $I = 1 \dots 5$ двух типов (рис. 2,в, рис. 2,з). Подсистема (рис. 2,в) состоит из семи зон ($n = 7$): зоны $i = 1, \dots, 6$ – условные поверхности, поверхностные зоны металла и кладки; $i = 7$ – объемная газовая зона; подсистема (рис. 2,з) – из восьми зон ($n = 8$): зоны $i = 1 \dots 7$ – условные поверхности, поверхностные зоны металла, кладки и термоэлектрического термометра; $i = 8$ – объемная газовая зона.

Взаимодействие смежных подсистем осуществляется через соответствующие условные поверхности, которые имеют такие значения температуры, при которых плотность потоков результирующего излучения на границах подсистемы (q_{me} – плот-

ность потока результирующего излучения, проходящего через поверхностную зону металла; $q_{кл}$ – плотность потока результирующего излучения, проходящего через поверхностную зону кладки; $q_{J,I}$ – плотность потока результирующего излучения, проходящего через условную поверхность, отделяющую объемную зону I от смежной объемной зоны J) сохраняют свое действительное значение. Определение величины данных температур производят путем расчета радиационного теплообмена в отдельных подсистемах и согласования их величин на границах смежных подсистем (рис. 2,б) по следующему соотношению

$$q_{J,I} = -q_{I,J} = \sigma_0 \cdot (T_{J,I}^4 - T_{I,J}^4), \quad (8)$$

где $q_{I,J}$ – плотность потока результирующего излучения, проходящего через условную поверхность, отделяющую объемную зону J от смежной объемной зоны I ; $T_{J,I}$ – температура условной поверхности, отделяющей объемную зону I от смежной объемной зоны J ; $T_{I,J}$ – температура условной поверхности, отделяющей объемную зону J от смежной объемной зоны I ; σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана.

Расчет радиационного теплообмена в пределах отдельной подсистемы I осуществляют резольвентным зональным методом [2] с использованием разрешающих обобщенных угловых коэффициентов, связывающих в рассматриваемой подсистеме результирующие и собственные тепловые потоки зон.

Определение разрешающих обобщенных угловых коэффициентов производят в три этапа:

– для принятых типов подсистем (рис. 2,в, рис. 2,г) методом Монте-Карло [9] рассчитывают геометрические угловые коэффициенты излучения $\varphi_{k,i}$, где $i, k = 1 \dots n$;

– обобщенные угловые коэффициенты излучения вычисляют с использованием соотношения

$$\Phi_{k,i} = \varphi_{k,i} \cdot \exp[-k_I \cdot S_I^{\text{эф}}], \quad i, k = 1 \dots n; \quad (9)$$

– разрешающие обобщенные угловые коэффициенты излучения определяют путем решения системы уравнений

$$\Psi_{k,i} = \Phi_{k,i} + \sum_{j=1}^{n-1} \Phi_{k,j} \cdot R_j \cdot \Psi_{j,i}, \quad i, k = 1 \dots n. \quad (10)$$

Далее вычисляют коэффициенты радиационного теплообмена

$$a_{k,i} = \varepsilon_k \cdot \sigma_0 \cdot F_k \cdot (\Psi_{k,i} \cdot \varepsilon_i - \Delta_{k,i}), \quad i, k = 1 \dots n, \quad (11)$$

где $\Delta_{k,i}$ – символ Кронекера, ($\Delta_{k,i} = 1$ при $k = i$, $\Delta_{k,i} = 0$ при $k \neq i$).

Записывают систему уравнений, которая содержит:

– зональные уравнения для поверхностных зон

$$Q_i = \sum_{k=1}^n a_{k,i} \cdot T_k^4, \quad i = 1, \dots, n-1 \quad (12)$$

– зональное уравнение для объемной зоны

$$\sum_{k=1}^n a_{k,i} \cdot T_k^4 + g_I \cdot T_i + g_I^0 + Q_i^v = 0, \quad i = n, \quad (13)$$

где Q – результирующий тепловой поток; T – зональная температура; g_I – коэффи-

коэффициент конвективного теплообмена для объемной зоны I -той подсистемы; g_I^0 – сумма слагаемых, не зависящих от температуры объемной зоны, Вт; Q_I^y – выделение теплоты в объемной зоне при сжигании топлива.

Выделение теплоты, а также коэффициенты g_I и g_I^0 для объемной зоны I -той подсистемы определяют по формулам:

$$Q_I^y = B \cdot Q_n^p \cdot (C_I^m - C_{I+1}^m), \quad I = 1 \dots 5, \quad (14)$$

$$g_I = - \left[c_{p,I}^{n,cz} \cdot G_{n,cz} \cdot (1 - C_{I+1}^m) + c_{p,I}^m \cdot C_{I+1}^m + c_{p,I}^e \cdot \Omega_\delta \cdot C_{I+1}^m \right] \cdot B, \quad I = 1 \dots 5; \quad (15)$$

$$g_I^0 = \left\{ \left[c_p^m \cdot (T_m - 273) + c_p^e \cdot \Omega_\delta \cdot (T_\delta - 273) \right] + 273 \left[c_{p,I}^{n,cz} \cdot G_{n,cz} \cdot (1 - C_{I+1}^m) + c_{p,I}^m \cdot C_{I+1}^m + c_{p,I}^e \cdot \Omega_\delta \cdot C_{I+1}^m \right] \right\} \cdot B, \quad I = 1; \quad (16)$$

$$g_I^0 = \left\{ \left[c_{p,I-1}^{n,cz} \cdot G_{n,cz} \cdot (1 - C_I^m) + c_{p,I-1}^m \cdot C_I^m + c_{p,I-1}^e \cdot \Omega_\delta \cdot C_I^m \right] \cdot (T_{n,I-1} - 273) + 273 \left[c_{p,I}^{n,cz} \cdot G_{n,cz} \cdot (1 - C_{I+1}^m) + c_{p,I}^m \cdot C_{I+1}^m + c_{p,I}^e \cdot \Omega_\delta \cdot C_{I+1}^m \right] \right\} \cdot B, \quad I = 2 \dots 5, \quad (17)$$

где B , Q_n^p – расход топлива на печь и его низшая теплота сгорания соответственно; C_I^m , C_{I+1}^m – концентрация топлива на границах объемной зоны I -той подсистемы; $G_{n,cz}$ – количество продуктов полного сгорания одного килограмма топлива; Ω_δ – действительное количество воздуха, необходимого для полного сгорания одного килограмма топлива; $T_{n,I}$ – температура объемной зоны I -той подсистемы; $c_{p,I}^{n,cz}$, $c_{p,I}^m$, $c_{p,I}^e$ – средняя удельная массовая теплоемкость продуктов сгорания, топлива и воздуха при постоянном давлении в интервале температур от 273 К до $T_{n,I}$; c_p^m , c_p^e – средняя удельная массовая теплоемкость для топлива и воздуха, которые поступают в печь с температурой T_m и T_δ соответственно.

При известных значениях температуры поверхностных зон и выделения теплоты в объемных зонах рассматриваемой зональной модели (рис. 1) решение системы зональных уравнений типа (12)-(13) совместно с уравнениями (8) позволяет определить на каждом временном шаге температуру объемных зон и результирующие тепловые потоки для поверхностных зон.

Задача внутреннего теплообмена. В рассматриваемой зональной модели поверхностные зоны являются границами, отделяющими объемные газовые зоны от объемных зон металла, кладки и термоэлектрического термометра (рис. 1, б). Допущение о постоянстве величин, характеризующих теплообмен в пределах каждой расчетной поверхностной зоны, позволяет рассматривать нагрев объемных зон металла и кладки, как нагрев бесконечных одно- и двухслойных пластин, распределение температуры $t(y, \tau)$ по толщине слоя которых описывают одномерным дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности в декартовых координатах

$$c'(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial y} \right], \quad 0 \leq \tau \leq \tau^k, \quad (18)$$

где τ – текущее время y – текущая координата на оси, перпендикулярной к соответствующей поверхностной зоне и направленной в сторону увеличения температуры; t , τ^k , c' , λ – температура; время нагрева; объемная удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала слоя объемной зоны металла или кладки.

Дифференциальное уравнение (18) дополняют начальным и граничными условиями:

$$t(y,0) = t^H(y), \quad (19)$$

где $t^H(y)$ – начальное распределение температуры по толщине слоя соответствующей объемной зоны металла или кладки.

Граничные условия определяют с учетом конструкции ограждений рабочей камеры печи и условий нагрева металла и кладки. Анализ этих параметров позволяет определить:

– нагрев металла и кладки разделительной стенки печи, выполненной из огнеупорного шамотного кирпича (объемные зоны, соответствующие поверхностным зонам $I = 6 \dots 10, 27$, рис. 1,а), как симметричный нагрев однослойной пластины:

$$\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 ; \quad (20)$$

– на поверхности, которая граничит с объемной газовой зоной,

$$\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=\frac{\delta}{2}} = q_I , \quad (21)$$

где δ – геометрическая толщина; $q_I = \frac{Q_I}{F_I}$ – плотность результирующего теплового потока для соответствующей поверхностной зоны;

– нагрев кладки подвесного свода печной камеры, выполненного из огнеупорного шамотного кирпича (объемные зоны, соответствующие поверхностным зонам $I = 11 \dots 15$, рис. 1,а), как несимметричный нагрев однослойной пластины:

– на поверхности, граничащей с окружающей средой

$$-\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha_{o.c.} \cdot (t_{нар} - t_{o.c.}) ; \quad (22)$$

– на поверхности, граничащей с объемной газовой зоной,

$$\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=\delta} = q_I , \quad (23)$$

где $\alpha_{o.c.}$ – коэффициент теплоотдачи излучением и конвекцией от наружной поверхности кладки в окружающую среду [10]; $t_{нар}$ – температура наружной поверхности кладки; $t_{o.c.}$ – температура окружающей среды;

– нагрев заслонки, торцевой стены печной камеры и боковой стены со стороны установки горелочных устройств, выполненных двухслойными из теплоизоляционного пенодиатомитового и шамотного кирпичей (объемные зоны, соответствующие поверхностным зонам $I = 16 \dots 26$, рис. 1,а) рассматривают как несимметричный нагрев двухслойной пластины с толщинами теплоизоляционного $\delta_{из}$ и огнеупорного слоев $\delta_{оз}$:

– на поверхности, граничащей с окружающей средой

$$-\lambda_{из} \cdot \frac{\partial t_{из}}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha_{o.c.} \cdot (t_{нар} - t_{o.c.}) ; \quad (24)$$

– в плоскости соприкосновения слоев ($y = \delta_{из}$)

$$\lambda_{uz} \cdot \frac{\partial t_{uz}}{\partial y} = \lambda_{oz} \cdot \frac{\partial t_{oz}}{\partial y} ; \quad (25)$$

– на поверхности, граничащей с объемной газовой зоной,

$$\lambda_{oz} \cdot \frac{\partial t_{oz}}{\partial y} \Big|_{y=(\delta_{uz}+\delta_{oz})} = q_I , \quad (26)$$

где λ_{uz} , λ_{oz} – соответственно коэффициенты теплопроводности материала теплоизоляционного и огнеупорного слоев футеровки.

Допущение о постоянстве величин, характеризующих теплообмен в пределах сферической поверхностной зоны термоэлектрического термометра, позволяет рассматривать нагрев соответствующей ему объемной зоны, как нагрев двухслойного шара, распределение температуры $t(r, \tau)$ в отдельных слоях которого описывают одномерным дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности в сферических координатах

$$c'(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda(t) \cdot r^2 \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right] , \quad 0 \leq \tau \leq \tau^{\hat{e}} , \quad (27)$$

где r – текущее значение радиус-вектора, R_m , δ_a – соответственно радиус внутренней полости шара, заполненной металлом рабочего спая термоэлектрического термометра и толщина шарового слоя алунда.

Дифференциальное уравнение (27) дополняют начальным ($\tau = 0$):

$$t(r, 0) = t^h(r) , \quad (28)$$

где $t^h(r)$ – начальное распределение температуры в слоях объемной зоны термоэлектрического термометра, –

и граничными условиями:

– в центре симметрии поля температуры ($r = 0$):

$$\lambda_m \cdot \frac{\partial t_m}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 ; \quad (29)$$

– на поверхности соприкосновения слоев ($r = R_m$):

$$\lambda_m \cdot \frac{\partial t_m}{\partial r} = \lambda_a \cdot \frac{\partial t_a}{\partial r} ; \quad (30)$$

– на поверхности, граничащей с объемной газовой зоной:

$$\lambda_a \cdot \frac{\partial t_a}{\partial r} \Big|_{r=(R_m+\delta_a)} = q_I , \quad (31)$$

где λ_m , λ_a – соответственно коэффициенты теплопроводности металла спая термоэлектрического термометра и алунда.

Решение дифференциального уравнения (18) с краевыми условиями (19)-(26) для объемных зон металла и кладки, а также дифференциального уравнения (27) с краевыми условиями (28)-(31) для объемной зоны термоэлектрического термометра, выполняют методом конечных разностей с использованием неявной четырехточечной разностной схемы [2] на соответствующих пространственно-временных сетках

$$y_j = j \cdot \Delta y , \quad j = 1 \dots h , \quad \Delta y = \frac{\delta \Sigma}{h} ; \quad (32)$$

$$r_j = j \cdot \Delta r, \quad j = 1 \dots h, \quad \Delta r = \frac{R_m + \delta_a}{h}; \quad (33)$$

$$\tau_p = p \cdot \Delta \tau, \quad p = 1 \dots m, \quad \Delta \tau = \frac{\tau^k}{m}, \quad (34)$$

где Δy , Δr – величина шага по соответствующей пространственной координате; $\Delta \tau$ – величина шага по времени; δ^{Σ} – расчетная толщина пластины, определяемая в зависимости от количества слоев и условий нагрева объемных зон металла и кладки; h – количество расчетных узлов на пространственных сетках; m – количество расчетных узлов на временной сетке.

В результате решения, рассмотренных выше краевых задач, на каждом временном шаге определяют дискретные температурные поля объемных зон металла, кладки, термоэлектрического термометра и зональные температуры соответствующих им поверхностных зон.

Задача сопряженного теплообмена. Решение сопряженной задачи теплообмена для рассматриваемой зональной модели на каждом временном шаге выполняют по итерационной процедуре:

– задание начального приближения для температур поверхностных зон T_I ($I = 6 \dots 28$).

– решение внешней задачи: определение результирующих тепловых потоков для поверхностных зон Q_I ($I = 6 \dots 28$).

– решение внутренней задачи: по известному распределению тепловых потоков Q_I вычисление температуры соответствующих поверхностных зон T_I^* ($I = 6 \dots 28$).

– определение максимальной погрешности $\max |T_I^* - T_I|$ и присвоение уточненных значений температуры T_I^* переменным параметрам T_I .

– если величина $\max |T_I^* - T_I|$ не превышает заданный уровень, осуществляют переход к следующему временному шагу, в противном случае выполняют возврат к расчету результирующих тепловых потоков для поверхностных зон.

Заключение. Разработана математическая модель нагрева металла в камерной печи, которая основана на совместном решении в дискретном времени задач внешнего и внутреннего теплообмена. Зональная модель внешнего теплообмена в рассматриваемой печи представлена отдельными подсистемами, последовательно расположенными в направлении движения горящих газов. Взаимодействие между смежными подсистемами осуществляется через условные поверхности. Модель позволяет учитывать неравномерность выгорания топлива, изменение оптических характеристик поглощающе-излучающей среды, перенос теплоты движущимися газами в направлении развития факела, а также рассчитать распределение результирующих тепловых потоков на внутренних граничных поверхностях объемных зон металла и кладки. Модель внутреннего теплообмена представлена одномерным дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности с начальными и граничными условиями, соответствующими конкретным объемным зонам металла и кладки. Решение задачи внутреннего теплообмена позволяет определить распределение температуры на поверхности и в поперечном сечении садки нагреваемого металла, а также учитывать теплоту, аккумулированную кладкой, и потери теплоты в окружающую среду наружной поверхностью ограждений печи. Такой подход позволяет рассматривать широкий перечень практических задач с детализацией, недоступной для средств измерения в реальных производственных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Губинский В. И.* Актуальные задачи реконструкции нагревательных печей / В. И. Губинский // *Металлургическая теплотехника (Сб. науч. трудов НМетАУ)*. В 2-х томах. – Днепропетровск: Пороги, 2005. – Т. 1. – С. 149-155.
2. *Арутюнов В. И.* Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В. И. Арутюнов, В. В. Бухмиров, С. А. Крупенников. – М.: Metallurgy, 1990. – 239 с.
3. *Крупенников С. А.* Зональный метод расчета радиационного и сложного теплообмена: основные положения и способы численной реализации / С. А. Крупенников // *Известия Вузов. Черная металлургия*. – 2006. – № 3. – С. 59-62.
4. *Расчеты нагревательных печей / Под ред. Н. Ю. Тайца*. – [2-е изд.] – Киев: Техника, 1969. – 539 с.
5. *Лисиенко В. Г.* Интенсификация теплообмена в пламенных печах / В. Г. Лисиенко. – М.: Metallurgy, 1979. – 224 с.
6. *Лисиенко В. Г.* Теплофизика металлургических процессов [учебник для вузов] / В. Г. Лисиенко, В. И. Лобанов, Б. И. Китаев. – М.: Metallurgy, 1982. – 239 с.
7. *Теплотехнические расчеты металлургических печей / Под ред. А. С. Телегина*. – М.: Metallurgy, 1982. – 358 с.
8. *Бухмиров В. В.* Упрощенный зональный метод расчета радиационного теплообмена в поглощающей и излучающей среде / В. В. Бухмиров, С. А. Крупенников // *Известия Вузов. Черная металлургия*. – 1999. – № 1. – С. 68-70.
9. *Лисиенко В. Г.* Математическое моделирование теплообмена в печах и агрегатах / В. Г. Лисиенко, В. В. Волков, А. Л. Гончаров. – Киев: Наукова думка, 1984. – 230 с.
10. *Расчеты нагревательных и термических печей. Справочник / Под ред. В. М. Тымчака и В. Л. Гусовского*. – М.: Metallurgy, 1983. – 481 с.

Стаття надійшла до редакції 01.07.2009 р.
Рецензент – проф. В.М. Голубцов