



*Using the developed mathematical model of coupled (external and internal) heat exchange, allowing for the form and thermoprocessing peculiarities of the continuous pusher-type furnace, there are improved the temperature-thermal conditions of slabs heating in furnace of mill 2250 of Alchevsk metallurgical industrial complex.*

П. Э. РАТНИКОВ, Белорусский национальный технический университет,  
Э. О. ЦКИТИШВИЛИ, ОАО "Алчевский металлургический комбинат"

УДК 621.783.321.1

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ СТАНА 2250 АЛЧЕВСКОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМБИНАТА В СОПРЯЖЕННОЙ ПОСТАНОВКЕ

С учетом современных требований к моделированию теплофизических процессов при нагреве массивных слитков и заготовок в промышленных печах математическая модель должна учитывать теплотехнические, конструктивные и технологические особенности нагревательных печей (расположение горелочных устройств и форму факела, движение теплоносителей, геометрию и взаимное расположение заготовок, несимметричность нагрева, темп продвижения металла, марку стали и т.д.). Наиболее полно этим требованиям отвечают математические модели сопряженного (внешнего и внутреннего) теплообмена. Используя опыт ра-

боты Белорусского национального технического университета в области исследований тепловой работы газопламенных печей и в продолжение ранее опубликованных работ (например, [1–3]), ниже приведена сопряженная математическая модель теплообмена применительно к методическим печам листового стана 2250 Алчевского металлургического комбината (Украина).

Методические печи (две) листопрокатного цеха № 1 предназначены для нагрева слэбов углеродистых и легированных марок сталей. Техническая характеристика печей приведена в табл. 1, а схема конструкции печи – на рис. 1.

Таблица 1. Технические характеристики методической толкательной печи стана 2250

Параметр	Характеристика
Тип печи	Нагревательная, толкательная с нижним подогревом и двухрядным посадом
Длина печи полезная, м	22,47
Полезная площадь пода, м <sup>2</sup>	103,4
Количество зон регулирования, шт.	4
Размеры печи (длина) по зонам, мм:	
методическая	6000
II сварочная верхняя	5150
I сварочная верхняя	6400
томильная	4550
Расстояние между глиссажными трубами, мм	800
Топливо-природнодоменная смесь с теплотой сгорания, МДж/м <sup>3</sup>	11,7–12,5
Горелки двухпроводные низкого давления типа	«Труба в трубе»
Количество горелок:	
нижняя сварочная зона	6
II сварочная верхняя	4
I сварочная верхняя	5
томильная	4
Температура подогрева воздуха, °С	400

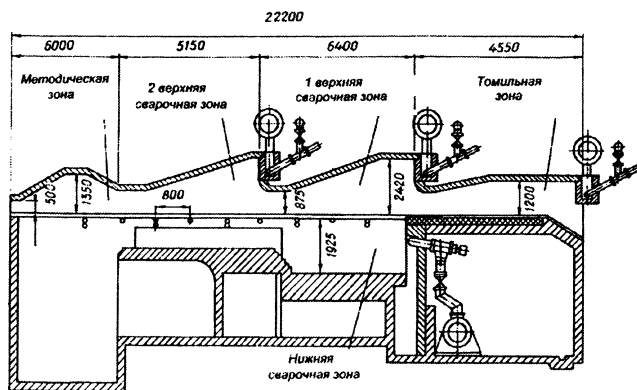


Рис. 1. Схема нагревательной печи стана 2250 ОАО "Алчевский металлургический комбинат"

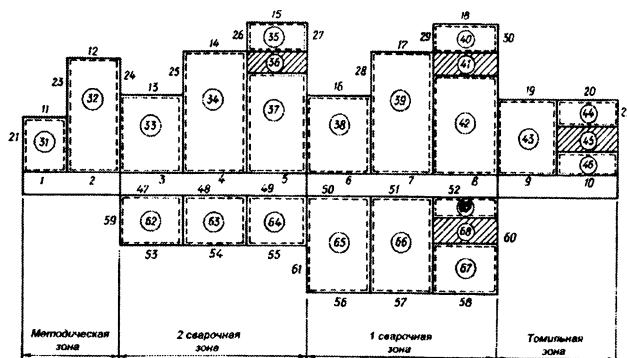


Рис. 2. Расчетная схема печи стана 2250

Методическая печь данного типа характеризуется существенной асимметрией верхнего и нижнего строений. Технологические зоны верхнего и нижнего строений отличаются как по количеству, так и по форме. Наиболее отчетливо это видно по сварочной зоне, которая образована двумя верхними и одной нижней сварочными зонами. При этом наблюдаются значительные различия между верхними и нижней сварочными зонами как по конструкции, так и по расположению факелов горелок. Трапециевидная форма сварочных зон требует выработки специального подхода при дискретизации области печного пространства на расчетные зоны. В [3] отмечено, что замена трапециевидной сварочной зоны на эквивалентную по объему прямоугольную, как используется в работе [4], является весьма серьезным упрощением, способным негативно повлиять на достоверность получаемых результатов. Поэтому в данной работе для учета конструктивных особенностей печи по аналогии с [3] использован прием, суть которого в следующем: наклонная линия трапеции, которая служит поперечным сечением каждой сварочной зоны, заменяется ломаной линией, состоящей из отрезков, сонаправленных с осями декартовой системы координат (рис. 2). Оптимальный выбор параметров такой замены связан с учетом ряда факторов: числом разбиений сварочных зон в осевом направлении, расположением горелок и факелов, а также реальными габаритами печи. Особенностью печи стана 2250 является также неклассическая форма методической зоны, для учета которой предлагается контур расчетной методической зоны принять в виде ступенчатой линии (рис. 2). Кроме того, следует отметить, что томильная зона является односторонней (верхней). Это обстоятельство требует построения асимметричного вычислительного алгоритма расчета, что является задачей более сложной, чем подобная задача для печей с равным числом технологических зон в верхнем и нижнем строениях, несмотря на некоторое уменьшение общего количества расчетных зон.

При разбиении на зоны нужно стремиться к минимизации их количества при сохранении возможности учета всех основных особенностей теплообмена в печи. Такой подход требует корректного в рамках всей математической модели выделения зон горения. Отметим, что адекватное отражение положений факелов горелок при дискретизации печного пространства весьма затруднено из-за того, что последние направлены под углом к поверхности металла. Каждая из технологических зон печи (методическая, верхние и нижняя сварочные зоны), где происходит значительное изменение температуры заготовок, разбита в направлении движения металла на три расчетных участка. Томильная зона, в которой происходит лишь выравнивание температуры, разделена на два расчетных участка. Кроме того, учитывая, что основные тепловые нагрузки на металл воздействуют, начиная со сварочной зоны, примем для методической зоны в целях сокращения числа расчетных зон симметричную (по высоте) модель теплообмена. Разделение тракта печи на 10 расчетных участков с учетом известных продольных размеров технологических зон печи обеспечивает при дискретизации области печного пространства получение на поверхности металла расчетных участков, соизмеримых по длине. Это в свою очередь позволяет проводить расчет температурного поля металла конечно-разностным методом на сетке с шагом, близким к постоянному, что, как известно из литературы, повышает точность расчета. При дискретизации печного пространства по высотам верхнего и нижнего строений будем исходить из необходимости явного выделения зон горения. Практика предыдущих исследований [4–6] показывает, что попытка "сэкономить" на количестве объемных расчетных зон путем подбора эмпирическим путем эффективного по мощности пространственного тепловыделения, эквивалентного фактическому и распределенного на минимальном количестве расчетных зон, может приводить к значительным погрешностям в расчетах. Таким образом, в зоне факела при дискрети-

зации печного пространства по высоте необходимо вводить, по меньшей мере, три зоны (зона горения и зоны, отделяющие ее от печного свода и поверхности металла). Очевидно, что наклон факелов горелок к плоскости металла затрудняет адекватное представление зон горения в рамках дискретизации всей расчетной области. Возможное представление зон горения в виде  $\Gamma$ -образных областей, образованных прямоугольниками, требует увеличения общего количества расчетных зон и усложнения всего вычислительного алгоритма. Поэтому в предлагаемой ниже модели использована наиболее простая форма учета положения зон горения, при которой они предполагаются прямоугольными (в плане) и расположенными параллельно поверхности металла.

Даже минимально допустимая дискретизация поверхностей металла, кладки и печного пространства, учитывающая конструктивные особенности рассматриваемой нагревательной печи, приводит к построению зональной модели теплообмена с 69 зонами (верхнее строение – 46 зон, нижнее строение – 23 зоны). Схема разбиения зон представлена на рис. 2.

Таким образом, математическая модель сводится к решению сопряженной задачи лучисто-конвективного теплообмена для системы “верхнее строение печи–модельная полоса металла–нижнее строение печи”. С учетом того, что любая задача лучистого теплообмена по своей природе является нелинейной и требует применения итерационных методов решения, использование последних позволяет одновременно решить и проблему увязки решений задач внешнего теплообмена для верхнего и нижнего строений печи. В целом задача требует совместного решения уравнений лучистого теплообмена для верхнего и нижнего строений печи и уравнения теплопроводности для полосы металла. Базисное решение задачи на одном итерационном шаге требует рассмотрения следующей совокупности уравнений [4].

Система уравнений для расчетных зон II рода, где заданы тепловые потоки:

$$\sum_{k=1}^{N^{в(н)}} \left( a_{ki}^{в(н)} T_k^{в(н)} + g_{ki}^{в(н)} T_k^{в(н)} \right) + g_i^{0^{в(н)}} + Q_i^{в(н)} = 0, \quad (1)$$

$$i \in N_2^{в(н)},$$

где  $N$  – общее число зон (для конкретного примера  $N = 65$ );  $N_2$  – множество номеров зон II рода ( $N_2 = 11, 46; 53, 65$ ).

Формула для вычисления тепловых потоков на поверхностях металла (зоны I рода)

$$Q_i^{в(н)} = \sum_{k=1}^{N^{в(н)}} \left( a_{ki}^{в(н)} T_k^{в(н)} + g_{ki}^{в(н)} T_k^{в(н)} \right) + g_i^{0^{в(н)}}, \quad i \in N_1, \quad (2)$$

где  $N_1$  – множество номеров зон I рода (зоны на верхней и нижней поверхностях металла, где задается температура); ( $N_1 = 1, 10; 47, 52$ );  $a_{ki}, g_{ki}, g_i^0, Q_i^v$  – коэффициенты радиационного (эффективные с учетом селективности излучения) и конвективного теплообмена, а также величины объемных тепловыделений; “в” и “н” – верхнее и нижнее строения печи.

Эффективные коэффициенты радиационного теплообмена  $a_{ki}^\Sigma$  в формулах (1), (2) запишем в виде:

$$a_{ki}^\Sigma = \sum_{m=1}^M \alpha_i^{\lambda_m} a_{ki}^{\lambda_m}. \quad (3)$$

В выражении (3) спектральные коэффициенты радиационного теплообмена  $a_{ki}^\lambda$  определим по формуле:

$$a_{ki}^\lambda = \epsilon_k \sigma_0 F_k (\Psi_{ki} \epsilon_i - \delta_{ki}), \quad k, i = \overline{1, N}, \quad (4)$$

где степень черноты газов

$$\epsilon_j = 1 - \exp(-K_j S_j^{\text{эф}}), \quad j = \overline{31, 46; 62, 69}; \quad (5)$$

$K$  – приведенные коэффициенты поглощения.

Спектральные обобщенные коэффициенты  $\Psi_{ki}$  найдем из выражения:

$$\Psi_{ki} = \varphi_{ki} \exp\left(-\sum K_j S_j^{\text{эф}}\right), \quad i = \overline{1, N}, \quad K = \overline{1, N}. \quad (6)$$

Для определения коэффициентов внутреннего теплообмена в выражениях (1), (2) запишем:

для объемных зон ( $i = \overline{31, 46; 62, 69}$ )

$$g_{ki} = \begin{cases} 0 & \text{при } k \neq j, k \neq i+1, k \neq i, \\ \alpha F_j & \text{при } k = j, \\ c_{p_{н.с}} G_{п.с} & \text{при } k = i+1, \\ -(\alpha \sum_j F_j + c_{p_{н.с}} G_{п.с}) & \text{при } k = i, \end{cases}$$

для поверхностных зон ( $i = \overline{11, 30; 53, 60}$ )

$$g_{ki} = \begin{cases} 0 & \text{при } k \neq j, k \neq i, \\ \alpha F_i & \text{при } k = j, \\ -\alpha F_i & \text{при } k = i, \end{cases}$$

где  $j$  – номер смежной объемной зоны.

В качестве зон горения в модели были приняты все зоны, принадлежащие собственно технологическим зонам, в которых происходит подача топлива, а именно: 33, 34, 36 (35 и 37 –отделяют зону факела от печного свода и поверхности металла) – II верхняя сварочная зона; 38, 39, 41 (40 и 42) – I верхняя сварочная зона; 43, 45 (44, 46) – томильная зона; 62, 63, 64 – II нижняя

сварочная зона; 65, 66, 68 (67, 69) – I нижняя сварочная зона.

По аналогии с [3] запишем распределение общего расхода топлива по выделенным расчетным зонам горения:

II верхняя сварочная зона:

$$G_{T33} = G_T K_{T_{св2в}} \chi_1, G_{T34} = G_T K_{T_{св2в}} \chi_2, G_{T36} = G_T K_{T_{св2в}} \chi_3,$$

I верхняя сварочная зона:

$$G_{T38} = G_T K_{T_{св1в}} \chi_1, G_{T39} = G_T K_{T_{св1в}} \chi_2, G_{T41} = G_T K_{T_{св1в}} \chi_3,$$

томильная зона:

$$G_{T43} = G_T K_{T_{том}} \chi_1, G_{T45} = G_T K_{T_{том}} \chi_2,$$

II нижняя сварочная зона:

$$G_{T62} = G_T K_{T_{св2н}} \chi_1, G_{T63} = G_T K_{T_{св2н}} \chi_2, G_{T64} = G_T K_{T_{св2н}} \chi_3,$$

I нижняя сварочная зона:

$$G_{T65} = G_T K_{T_{св2н}} \chi_1, G_{T66} = G_T K_{T_{св2н}} \chi_2, G_{T68} = G_T K_{T_{св2н}} \chi_3,$$

где  $G_T$  – общий расход топлива;  $K_{T_{св2в}}$ ,  $K_{T_{св1в}}$ ,  $K_{T_{том}}$ ,  $K_{T_{св2н}}$ ,  $K_{T_{св1н}}$  – коэффициент распределения топлива в зонах печи;  $\chi_1, \chi_2, \chi_3$  – коэффициенты, определяющие распределение топлива в пределах верхней и нижней, I и II сварочных зон ( $\chi_1 + \chi_2 + \chi_3 = 1$ ) и верхней томильной зоны ( $\chi_1 + \chi_2 = 1$ ). Варьирование значений трех коэффициентов  $\chi_1, \chi_2, \chi_3$  для каждой сварочной зоны не представляет трудностей, однако, исходя из эмпирических соображений, для всех зон были приняты следующие наборы значений:  $\chi_1 = \chi_2, \chi_3 = 0,4$ , что соответствует известным данным о максимуме температуры примерно посередине длины факелов. Для томильной зоны примем  $\chi_1 = \chi_2$ .

Распределение воздуха по технологическим зонам:

II верхняя сварочная зона:

$$G_{B33} = G_B K_{B_{св2в}} \chi_1, G_{B34} = G_B K_{B_{св2в}} \chi_2, G_{B36} = G_B K_{B_{св2в}} \chi_3,$$

I верхняя сварочная зона:

$$G_{B38} = G_B K_{B_{св1в}} \chi_1, G_{B39} = G_B K_{B_{св1в}} \chi_2, G_{B41} = G_B K_{B_{св1в}} \chi_3,$$

томильная зона:

$$G_{B43} = G_B K_{B_{том}} \chi_1, G_{B45} = G_B K_{B_{том}} \chi_2,$$

II нижняя сварочная зона:

$$G_{B62} = G_B K_{B_{св2н}} \chi_1, G_{B63} = G_B K_{B_{св2н}} \chi_2, G_{B64} = G_B K_{B_{св2н}} \chi_3,$$

I нижняя сварочная зона:

$$G_{B65} = G_B K_{B_{св2н}} \chi_1, G_{B66} = G_B K_{B_{св2н}} \chi_2, G_{B68} = G_B K_{B_{св2н}} \chi_3,$$

где  $G_B$  – общий расход воздуха;  $K_{B_{св2в}}$ ,  $K_{B_{св1в}}$ ,  $K_{B_{том}}$ ,  $K_{B_{св2н}}$ ,  $K_{B_{св1н}}$  – коэффициент распределения воздуха в зонах печи.

В зонах 35, 37, 40, 42, 44, 46, 67, 69 подачи топлива и воздуха не происходит, т.е. в этих зонах  $G_T = G_B = 0$ .

Мощность тепловыделения в указанных зонах горения в рамках принятой расчетной схемы можно рассчитать по формуле:

$$Q_i^V = G_T Q_n^p, \quad (7)$$

где  $i = 33,46; 62,69$ ;  $Q_n^p$  – теплота сгорания топлива.

Коэффициенты  $g_i^0$  из уравнения (1), где  $i = 33,46; 62,69$ , будут определяться с учетом направления движения продуктов сгорания и расположения технологических зон печи:

$$g_i^0 = c_{p_T} (T_T - 273) G_{T_i} + c_{p_B} (T_B - 273) G_{B_i} - c_{p_{п.ср}} (T_{п.ср} - 273) (G_{T_i} + G_{B_i}), \quad (8)$$

где  $c_{p_T}$ ,  $c_{p_B}$ ,  $c_{p_{п.ср}}$  – теплоемкости соответственно топлива, воздуха, продуктов сгорания;  $G_T$ ,  $G_B$  – расходы соответственно топлива и воздуха в зонах;  $T_T$ ,  $T_B$  – температуры подогрева соответственно топлива и воздуха.

В рамках сопряженной математической модели внешняя задача (1), (2) дополняется внутренней задачей, которая записывается следующим образом:

$$c_p \frac{\partial T_i}{\partial t'} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T_i}{\partial y} \right), \quad i \in N_1, \quad (9)$$

где  $t' = x/u$  ( $0 \leq x \leq L_i$ );

$$-\lambda \frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{y=-\delta} = \frac{Q_i^h}{F_i}, \quad i \in N_1, \quad (10)$$

$$\lambda \frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{y=\delta} = \frac{Q_i^b}{F_i}, \quad i \in N_1, \quad (11)$$

$$T_i \Big|_{r=0} = T_{i-1} \Big|_{r=L_{i-1}/u}, \quad i \in N_1. \quad (12)$$

Здесь  $u$  – скорость движения металла;  $F_i$  – площадь условной поверхности  $i$ -й зоны металла;  $\delta$  – половина толщины заготовки.

Численная реализация математической модели (1)–(12) осуществлена с использованием неявно-разностной конечной схемы. Алгоритм расчета следующий.

1. Задание входных параметров: геометрия печи, размеры технологических зон, переменные теплофизические характеристики топлива, воздуха, продуктов сгорания, металла, расходы газа и воздуха, марка стали, темп продвижения и другие параметры, которые не связаны с температурой металла, кладки, печного пространства.

2. Решение уравнения (1) с использованием итерационного метода Ньютона на основании заданных значений температур граничных поверхностей металла для областей верхнего и нижнего строений печи, затем определение тепловых потоков на поверхности металла по формуле (2).

3. Определение температурного поля по толщине заготовки по найденным на поверхностях металла тепловым потокам.

4. Проверка сходимости полученного решения для температур поверхностей металла.

5. Формирование массивов выходной информации, имеющей практический интерес.

Разработанная математическая модель сопряженного теплообмена (1)–(12) прошла параметрическую настройку по результатам промышленного эксперимента, проведенного в условиях работы методической печи стана 2250 Алчевского металлургического комбината.

Промышленный эксперимент проведен при следующих условиях: производительность печи – 31,075 т/ч; размеры заготовок – 0,7х0,4х1,43 м; холодный посад; малоуглеродистая сталь; расход топлива – 7700 м<sup>3</sup>/ч; расход воздуха – 20213 м<sup>3</sup>/ч; теплота сгорания топлива – 12,15 МДж/м<sup>3</sup>. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных приведены на рис. 3, из которого следует удовлетворительное согласование экспериментальных и расчетных данных.

На последующем этапе с использованием программного продукта были проведены расчеты, цель которых – поиск рациональных температурно-тепловых режимов нагрева металла в методической печи. Расчеты осуществлены в два этапа: на первом этапе при фиксированной производительности печи и постоянном расходе топлива производили

его перераспределение по зонам печи (табл. 2), на втором этапе, выбрав режимы с максимальной конечной температурой металла, уменьшали расход топлива до температур, предусмотренных технологической инструкцией.

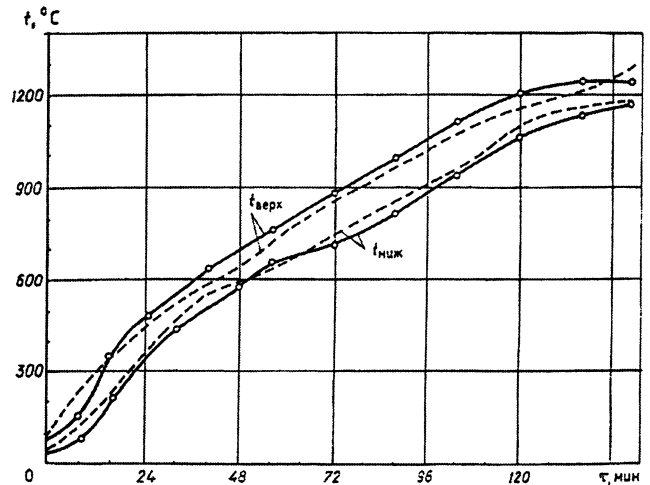


Рис. 3. Изменение температуры верхней и нижней поверхностей слэба при нагреве печи стана 2250: — эксперимент; - - - расчет

Таблица 2. Данные расчета температур металла в печи стана 2250

P, т/ч	Время, ч	Распределение расхода (топлива/воздуха) по зонам, %				Расход топлива/воздуха, м <sup>3</sup> /ч	Температура поверхности, К		ΔT, °C
		топильная	I верхняя сварочная	II верхняя сварочная	нижняя сварочная		верхняя	нижняя	
31,075	2,53	18,18	11,69	32,47	37,66	7700	1597,2	1551,3	35,7
		16,90	14,35	33,15	35,60	20213			
31,075	2,53	19,48	11,69	31,17	37,66	7700	1601	1553,9	36,6
		18,11	14,35	31,82	35,60	20213			
31,075	2,53	20,78	11,69	29,87	37,66	7700	1595,9	1548,6	36,8
		19,32	14,35	30,50	35,60	20213			
31,075	2,53	22,08	11,69	28,57	37,66	7700	1595,4	1547,3	37,4
		20,53	14,35	29,17	35,60	20213			
31,075	2,53	23,38	11,69	27,27	37,66	7700	1594,9	1546,2	38
		21,73	14,35	27,84	35,60	20213			
31,075	2,53	24,68	11,69	25,97	37,66	7700	1594,5	1545	38,5
		22,94	14,35	26,51	35,60	20213			
31,075	2,53	25,97	11,69	24,68	37,66	7700	1594	1543,8	39,1
		24,14	14,35	25,20	35,60	20213			
31,075	2,53	18,18	12,99	31,17	37,66	7700	1595,5	1549,7	35,6
		16,90	15,95	31,82	35,60	20213			
31,075	2,53	18,18	14,29	29,87	37,66	7700	1593,9	1548,2	35,5
		16,90	17,54	30,50	35,60	20213			
31,075	2,53	18,18	15,58	28,57	37,66	7700	1592,1	1546,5	35,4
		16,90	19,13	29,17	35,60	20213			
31,075	2,53	18,18	16,88	27,27	37,66	7700	1590,4	1545	35,3
		16,90	20,72	27,84	35,60	20213			
31,075	2,53	18,18	18,18	25,97	37,66	7700	1588,8	1543,5	35,3
		16,90	22,32	26,51	35,60	20213			
31,075	2,53	18,18	19,48	24,68	37,66	7700	1587,3	1542,1	35,2
		16,90	23,91	25,20	35,60	20213			
31,075	2,53	18,18	20,78	23,38	37,66	7700	1585,6	1540,5	35,1
		16,90	25,51	23,87	35,60	20213			
31,075	2,53	18,18	22,08	22,08	37,66	7700	1584	1539,1	35
		16,90	27,10	22,54	35,60	20213			
31,075	2,53	18,18	23,38	20,78	37,66	7700	1582,3	1537,5	34,9
		16,90	28,70	21,22	35,60	20213			
31,075	2,53	18,18	16,88	24,68	40,26	7700	1576,5	1532,7	34
		16,90	20,72	25,20	38,06	20213			
31,075	2,53	18,18	16,88	22,08	42,86	7700	1562,6	1520,6	32,7
		16,90	20,72	22,54	40,52	20213			
31,075	2,53	18,18	16,88	19,48	45,45	7700	1548,9	1508,5	31,4
		16,90	20,72	19,89	42,96	20213			

В результате обработки расчетных данных установлено рациональное распределение топлива по зонам. Учитывая технологические особенности рассматриваемых печей и принимая во внимание рекомендации работы [5] и трактовку методической печи как теплотехнологического агрегата со сварочной зоной, являющейся зоной сжигания (до 70% общего объема топлива), и методической зоной, являющейся зоной утилизации, распределе-

ние топлива по зонам приняли следующим, %:

Томи- льная	I верхняя сварочная	Нижняя сварочная	II верхняя сварочная
20	33	35	12

В результате проведенных исследований были отработаны рациональные температурно-тепловые режимы нагрева металла в печи стана 2250 (табл. 3).

Таблица 3. Температурный режим работы методических печей стана 2250

Группа стали	Существующий режим нагрева – Предлагаемый режим нагрева			
	томильная зона	I верхняя сварочная зона	нижняя сварочная зона	II верхняя сварочная зона
I	1270 – 1320	1330 – 1380	1310 – 1360	1290 – 1340
	1280 – 1330	1340 – 1390	1320 – 1380	1280 – 1320
II	1260 – 1300	1300 – 1350	1280 – 1330	1260 – 1290
	1260 – 1310	1320 – 1360	1310 – 1360	1250 – 1280
III	1240 – 1290	1280 – 1330	1260 – 1310	1250 – 1290
	1250 – 1300	1300 – 1360	1260 – 1300	1250 – 1270

Анализ результатов расчетов тепловых балансов и основных технико-экономических показателей, выполненных для условий тепловой работы методических печей стана 2250, показал, что при нагреве слябов по предлагаемым режимам обеспечивается снижение удельного расхода топлива на 1,7–2,5 кг у.т./т (в зависимости от производительности печи и типоразмера нагреваемых слябов), коэффициент полезного действия увеличился в среднем на 2–3%, величина окалины снизилась на 0,2 кг/т.

Экономический эффект от внедрения разработанных температурно-тепловых режимов печи стана 2250 Алчевского металлургического комбината составил более 30 тыс. у.е. в год.

### Заключение

Разработана математическая модель сопряженного теплообмена в методической печи толкательного типа с двусторонним обогревом, включающая в себя расчет внутреннего и внешнего теплообмена при задании расхода топлива в технологических зонах печи. Сопоставление с результатами промышленных экспериментов показало удовлетворительное согласование расчетных и экспери-

ментальных данных и, таким образом, подтвердило пригодность разработанных программных продуктов для дальнейшего использования. На основании проведенных исследований разработаны и внедрены рациональные температурно-тепловые режимы нагрева слябов в методических печах листового стана 2250 Алчевского металлургического комбината (Украина).

### Литература

1. Математическое моделирование нагрева заготовок в печи с шагающими балками (сопряженная постановка)/ В.И. Завелион, Р.Б. Вайс, И.А. Трусова и др. // Энергетика (Изв. высш. учебн. завед. и энергетических объединений стран СНГ). 1993. № 1–2. С. 113–117.
2. Исследование технологии нагрева непрерывнолитых заготовок высокоуглеродистых сталей в печах с шагающими балками/ В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова, П.П. Петух и др. // Сталь. 1995. № 4.
3. Математическое моделирование и усовершенствование тепловой работы многозонной методической печи/ Э.О. Цкиртишвили, В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова, А.П. Нессенчук, И.Г. Биох // Энергетика (Изв. высш. учебн. завед. и энергетических объединений стран СНГ). 2001. № 2. С. 69–80.
4. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. М.: Металлургия. 1990.
5. Тайц Н.Ю., Розенгарт Ю.И. Методические нагревательные печи. М.: Металлургия, 1964.