

М-I 115×460×860-05 и «Силал» М-II 230×460×860-1,0), имеющего типоряд по температуре: 100; 150; 200; 250 (300) °С и по производительности оборудования (промышленной печи): 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 (4,0) и 6 т/ч.

ЛИТЕРАТУРА

1. Расчет нагревательных и термических печей / С. Б. Василькова [и др.]; под ред. В. М. Тымчака, В. Л. Гусовского. – М.: Металлургия, 1983.
2. Справочник конструктора печей прокатного производства: в 2 т. / А. И. Бергауз [и др.]; под ред. В. М. Тымчака. – М.: Металлургия, 1970.

УДК 669.041

А. П. НЕСЕНЧУК, д-р техн. наук,
Р. Б. ВАЙС, канд. техн. наук,
Д. В. МЕНДЕЛЕВ (БНТУ),
Т. В. РЫЖОВА, канд. техн. наук (РУП «МАЗ»),
А. В. МАТОЧКИН (ОАО «Завод "ЛЕГМАШ"»),

К ВЫБОРУ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕЧИ ПРИ РАСЧЕТЕ ЛУЧИСТОГО ТЕПЛООБМЕНА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ

Лучистый теплообмен осуществляется между первым излучателем (факел, газы, электронагреватель) и вторичным – керамической футеровкой и поверхностью нагреваемой садки. При этом существует представление о том, что нагреваемые материалы получают эту сумму теплоты «от печи», т. е. печь и есть первоисточник теплоты. Таким образом, возникло новое понятие о температуре печи $T_{\text{печ}}$. Ясно, что в этом случае обобщенный излучатель (печь) суммирует теплопередачу излучением как действительного первоисточника энергии (факела, газов, электронагревателя), так и вторичного излучателя – футеровки. Печи приписывают свойство абсолютно черного тела как замкнутого пространства. Следовательно, температурой печи нужно называть температуру такого абсолютно

черного излучателя, который, находясь внутри пространства печи, способен передать на нагреваемые поверхности тел тепловой поток как сумму от газов (факела) и кирпичной кладки. Эта усредненная температура нового излучателя ниже температуры первоисточника T_r , T_ϕ (газов, факела), но выше температуры кирпичной кладки печи. Усредненная температура излучателей энергии в печи и называется температурой печи. Поскольку степень черноты газов мала ($\sim 0,1-0,3$), а степень черноты кладки велика ($\sim 0,8-0,9$), то температура печи весьма близка к температуре кладки печи. Такая модель процесса теплообмена излучением в печи оказалась весьма удачной. Она облегчает и упрощает определение $\varepsilon_{\text{сис}}$ и контроль за работой печи.

Непрерывное измерение высокой температуры газов в печах встречает большие практические трудности и возможно лишь периодически при помощи отсасывающей термопары. Следовательно, все теоретические расчеты теплообмена, произведенные по температуре газов в печи, остаются без контроля при работе печи. В таких условиях трудно установить, соответствует ли действительный температурный режим печи расчетному. Между тем в практике широко применяются измерения высоких температур радиационными пирометрами, которые на основании действия суммарного теплового потока излучением показывают температуру абсолютно черного излучателя, способного давать такой же лучистый поток, как и сложный излучатель в печи. При наличии в печи первичного излучателя (газов) и вторичного серого излучателя (кирпичной кладки) радиационный пирометр воспринимает общий поток излучения и таким образом определяет температуру печи $T_{\text{печ}}$. Наиболее правильным определением температуры печи будет тогда, когда прибор, измеряющий излучение, расположим на уровне нагреваемой поверхности и направим (как и металл) вверх к своду и стенам печи. Как уже отмечалось, температура печи близка к температуре кирпичной кладки, и нередко в практике расчетов эти температуры могут подменять друг друга без существенной практической погрешности.

Рассмотрим расчет общего теплового потока на металл по температуре эквивалентного излучателя $t_{\text{печ}}$ ($T_{\text{печ}}$). В расчетах теплообмена мы исходили, что $T_0 = T_r$ — температуры первичного излучателя — газов, находящихся в рабочем пространстве печи. Из сформулированного понятия о температуре печи как эквивалентного абсолютно

черного излучателя можно вычислить тепловой поток от печи на всю поверхность нагреваемых тел (металла) F_2 со степенью черноты ε_2 . Тепловой поток по-прежнему должен быть равен $Q_M = Q_{0,1,2}$ — общему тепловому потоку от газов и кирпичной кладки печи. Для расчета теплообмена по температуре печи $T_{\text{печ}}$ этому новому условному источнику теплоты нужно придать какие-то геометрические размеры, определяющие поверхность излучения, с которой связан результат теплообмена в замкнутом пространстве печи. При этом возникает несколько вариантов модели печи: 1) излучатель (печь) своей поверхностью как бы обволакивает нагреваемые тела (металл). Таким образом, излучатель (печь) имеет поверхность излучения $F_{\text{печ}}$, т. е. $F_{\text{печ}} = F_2$; 2) излучатель (печь) по форме и размерам соответствует контуру кирпичной кладки, которая имеет поверхность F_1 , т. е. $F_{\text{печ}} = F_1$. Каждая из этих моделей может быть положена в основу для установления связи температуры газов T_0 с температурой печи $T_{\text{печ}}$.

Согласно сказанному выше выражение для теплового потока можно записать в общем виде:

$$Q_M = Q_{0,1,2} = Q_{\text{печ},2}.$$

В развернутом виде

$$Q_M = (E_0 - E_2) F_2 \varepsilon_{0,1,2} = (E_{\text{печ}} F_{\text{печ}} \Phi_{\text{печ},2} - E_2 F_2 \Phi_{2,\text{печ}}) \varepsilon_{\text{печ},2},$$

или, учитывая, что $F_{\text{печ}} \Phi_{2,\text{печ}} = -F_2 \Phi_{\text{печ},2}$, получаем

$$Q_M = (T_0^4 - T_2^4) F_2 \sigma_a \varepsilon_{0,1,2} = (T_{\text{печ}}^4 - T_2^4) F_{\text{печ}} \Phi_{2,\text{печ}} \sigma_a \varepsilon_{\text{печ},2}.$$

Отсюда находим связь между $T_{\text{печ}}$ и T_0 (газ):

$$T_{\text{печ}}^4 = T_2^4 + (T_0^4 - T_2^4) \frac{\varepsilon_{0,1,2}}{\varepsilon_{\text{печ},2} \Phi_{2,\text{печ}}},$$

или

$$\frac{T_{\text{печ}}^4 - T_2^4}{T_0^4 - T_2^4} = \Phi_{\text{печ}} = \frac{\varepsilon_{0,1,2}}{\varepsilon_{\text{печ},2} \varphi_{2,\text{печ}}}.$$

Определяя независимым путем степень черноты системы «печь – металл» $\varepsilon_{\text{печ},2}$, можно найти $T_{\text{печ}} = f(T_0, T_2)$, так как степень черноты системы «газ – кладка – металл» $\varepsilon_{0,1,2}$ записана ранее [1].

Новая система «печь – металл» теперь состоит из двух поверхностей (тел) $F_{\text{печ}}$ и F_2 , между которыми происходит прямой теплообмен.

Вначале рассмотрим модель, по которой $F_{\text{печ}} = F_2$ и $F_{\text{печ}} \parallel F_2$, т. е. теплообмен происходит между двумя равными параллельными поверхностями печи и металла. Степень черноты двух тел ($\varepsilon_{1,2} = \varepsilon_{\text{печ},2}$ при $\varepsilon_1 = \varepsilon_{\text{печ}} = 1$) будет равна

$$\varepsilon_{\text{печ},2} = \varepsilon_{1,2} = \varepsilon_2. \quad (1)$$

Степень черноты системы «печь – металл» равна степени черноты металла ε_2 . Учитывая, что угловой коэффициент в этом случае $\varphi_{2,\text{печ}} = 1$, получаем [1]

$$\Phi_{\text{печ}} = \varepsilon_{0,1,2} / \varepsilon_{1,2}.$$

Для случая, когда $\varphi_{2,2} \neq 0$ и $\varphi_{1,1} \neq 0$, $\varepsilon_{0,1,2}$ определяется из уравнения

$$\Phi_{\text{печ}} = \frac{\varepsilon_{0,1,2}}{\varepsilon_2} = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_0 + \varphi_{1,2} \varepsilon_2 (1 - \varepsilon_0)}. \quad (2)$$

Проверяя предел, когда $\varepsilon_0 = 1$, получаем $\Phi_{\text{печ}} = 1$, т. е. $T_{\text{печ}} = T_0 = T_{\text{газ}}$. Тогда

$$\Phi_{\text{печ}} = \frac{\varepsilon_{0,1,2}}{\varepsilon_2} = \frac{\varepsilon_0 [1 + \varphi_{1,2} (1 - \varepsilon_0)]}{\varepsilon_0 + \varphi_{1,2} \varepsilon_2 (1 - \varepsilon_0) (1 - \varepsilon_2)}$$

В пределе, если $\varepsilon_0 = 1$ $\Phi_{\text{печ}} = 1$, т. е. $T_{\text{печ}} = T_0 = T_r$. Таким образом, по этой модели получается логически приемлемая связь между $T_{\text{печ}}$ и $T_r(T_0)$.

Рассмотрим модель, когда $F_{\text{печ}} = F_1$, т. е. поверхность кирпичной кладки представляет собой по размерам и форме поверхность печи. По-прежнему согласно уравнению (1), учитывая, что $\varepsilon_{\text{печ},2} = \varepsilon_{1,2}$, а $\varphi_{2,\text{печ}} = \varphi_{2,1}$, запишем

$$T_{\text{печ}}^4 = T_2^4 + (T_0^4 - T_2^4) \frac{\varepsilon_{0,1,2}}{\varepsilon_{\text{печ},2} \varphi_{2,\text{печ}}} = T_2^4 + (T_0^4 - T_2^4) \frac{\varepsilon_{0,1,2}}{\varepsilon_{1,2} \varphi_{2,1}}$$

Если $\varphi_{2,2} \neq 0$, а $\varphi_{1,1} \neq 0$, то $\varepsilon_{0,1,2}$ определяется

$$\varepsilon_{0,1,2} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_2 [1 + \varphi_{1,2} (1 - \varepsilon_0)]}{\varepsilon_0 + \varphi_{1,2} (1 - \varepsilon_0) [1 - (1 - \varepsilon_2) (1 - \varepsilon_2)]}, \quad \varphi_{2,1} = 1.$$

При $\varepsilon_1 = \varepsilon_{\text{печ}} = 1$

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varphi_{1,2} \varepsilon_2 (1 - \varepsilon_1)} = \varepsilon_2.$$

После подстановки будем иметь

$$\Phi_{\text{печ}} = \frac{T_{\text{печ}}^4 - T_2^4}{T_0^4 - T_2^4} = \frac{\varepsilon_{0,1,2}}{\varepsilon_{1,2} \varphi_{2,1}} = \frac{\varepsilon_0 [1 + \varphi_{1,2} (1 - \varepsilon_0)]}{\varepsilon_0 + \varphi_{1,2} (1 - \varepsilon_0) [(1 - (1 - \varepsilon_0) (1 - \varepsilon_2))]}.$$

В пределе, если $\varepsilon_0 = 1$ $\Phi_{\text{печ}} = 1$, т. е. $T_{\text{печ}} = T_0 = T_{\text{газ}}$, ответ вполне логичный.

Если $\varphi_{2,2} \neq 0$ и $\varphi_{1,1} \neq 0$, то при $\varepsilon_1 = 1$ [1]

$$\varepsilon_{0,1,2} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_2}{\varepsilon_0 + \varphi_{1,2} \varepsilon_2 (1 - \varepsilon_0)}, \text{ а } \varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_2}{1 - \varphi_{2,2} (1 - \varepsilon_2)}.$$

В итоге будем иметь

$$\Phi_{\text{печ}} = \frac{\varepsilon_{0,1,2}}{\varepsilon_{1,2} \varphi_{2,1}} = \frac{\varepsilon_0 [1 - \varphi_{2,2} (1 - \varepsilon_2)]}{\varphi_{2,1} [\varepsilon_0 + \varphi_{1,2} \varepsilon_2 (1 - \varepsilon_0)]}.$$

В пределе, когда $\varepsilon \rightarrow 1$, записываем

$$\Phi_{\text{печ}} = \frac{1 - \varphi_{2,2} (1 - \varepsilon_2)}{\varphi_{2,1}}.$$

Следовательно, при $\varepsilon \rightarrow 1$ $\Phi_{\text{печ}}$ может принимать значения больше единицы (т. е. $T_{\text{печ}} > T_0$), что уже нелогично. Это объясняется тем, что при $\varepsilon_0 = 1$ и $\varphi_{2,2} \neq 0$ металл перестает излучать на себя и на кладку печи. То же самое происходит с излучением от кладки на металл, так как газ уже непроницаем. Нагрев металла осуществляется только от излучения газа, и степень черноты системы не зависит ни от $\varphi_{2,2}$, ни от $\varphi_{1,2}$, а только от степени черноты металла ε_2 .

Для случая, когда нагрев происходит излучением между продуктами сгорания органического топлива и поверхностью нагреваемой садки (рассматриваемый случай исключает использование плоскопламенных горелок, к примеру, ГПП) в качестве примера выполнен расчет коэффициентов теплоотдачи излучением для температурных зон рабочего пространства методической нагревательной печи с шагающими балками стана 150 Белорусского металлургического завода (рис. 1).

Рассчитаем степень черноты излучающих газов ($\varepsilon_r = \beta \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} + \varepsilon_{\text{CO}_2}$). С этой целью находим парциальные давления p_{CO_2} и $p_{\text{H}_2\text{O}}$. Имеем:

$$p_{\text{CO}_2} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{\Sigma V_i} B; \quad p_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{\Sigma V_i} B,$$

где B – атмосферное давление: $B = 10^5$ Па (1 ата).

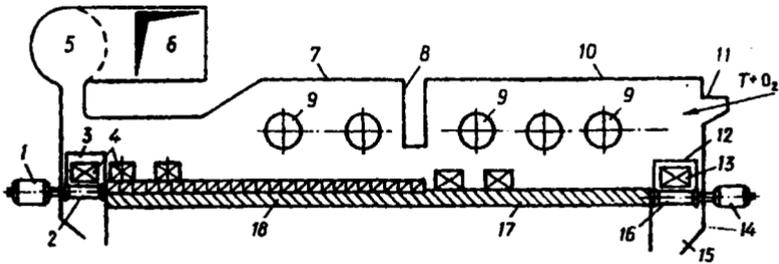


Рис. 1. Общий вид печи с шагающими балками стана 150 Белорусского металлургического завода: 1 – привод рольганга загрузки; 2 – ролик рольганга загрузки (боковая загрузка); 3 – окно загрузки; 4 – заготовка (блум) 0,125×0,125×12,0 м; 5 – дымоход; 6 – боров на рекуперацию и утилизацию теплоты газов; 7 – плоский свод (ширина в свету 12,8 м); 8 – пережим (охлаждаемый) рабочего пространства; 9 – горелочное устройство; 10 – плоский свод (ширина в свету 12,8 м); 11 – торцевые горелочные устройства; 12 – боковое окно выгрузки заготовок; 13 – нагретая заготовка на выдате из печи; 14 – привод рольганга выдачи; 15 – выдача окалины; 16 – ролик (водоохлаждаемый) рольганга выдачи; 17 – шагающая балка (без устройства для кантовки заготовок); 18 – то же, что и 17, но с устройством для кантовки

Для природного газа $Q_H^D = 33,44 \text{ МДж/м}^3$:

$$\Sigma V_i = 10,5 \text{ м}^3/\text{м}^3; V_{\text{CO}_2} = 8,7 \%; V_{\text{H}_2\text{O}} = 17 \%$$

Выполняем перерасчет V_{CO_2} и $V_{\text{H}_2\text{O}}$ на $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{8,7 \cdot 10,5}{100} = 0,91 \text{ м}^3/\text{м}^3; V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{17 \cdot 10,5}{100} = 1,79 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Находим:

$$p_{\text{CO}_2} = \frac{0,91}{10,5} \cdot 10^5 = 0,087 \cdot 10^5 \text{ Па}; p_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{1,79}{10,5} \cdot 0,170 \cdot 10^5 = \text{Па}.$$

Рассчитываем значения $(p\bar{S}_i)_{\text{CO}_2}$ и $(p\bar{S}_i)_{\text{H}_2\text{O}}$, где \bar{S}_i – эффективная длина луча для i -й зоны печи. Эффективная длина луча может быть записана в виде

$$\bar{S}_i = 0,9 \frac{4V_i}{F_i},$$

где V_i – излучающий объем i -й зоны печи, м^3 ; F_i – площадь оболочки, ограничивающей этот объем, м^2 .

Для конкретного случая для зон 1 (до пережима) и 2 (после пережима потока газов)

$$V_1 = 24 \text{ м}^3, F_1 = 28 \text{ м}^2; V_2 = 19,2 \text{ м}^3, F_2 = 22,4 \text{ м}^2.$$

Для зон 1 и 2 находим:

$$\bar{S}_i = 0,9 \frac{4 \cdot 24}{28} = 3,09 \text{ м}; \quad \bar{S}_i = 0,9 \frac{4 \cdot 19,2}{22,4} = 3,08 \text{ м}.$$

Записываем:

$$\begin{array}{l} \text{зона 1} \\ \left\{ \begin{array}{l} (p\bar{S})_{\text{CO}_2}^{(1)} = 0,087 \cdot 10^5 \cdot 3,09 = 0,269 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot \text{м} = 26,9 \text{ кН/м}; \\ (p\bar{S})_{\text{H}_2\text{O}}^{(1)} = 0,170 \cdot 10^5 \cdot 3,09 = 0,525 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot \text{м} = 52,5 \text{ кН/м}; \end{array} \right. \\ \\ \text{зона 2} \\ \left\{ \begin{array}{l} (p\bar{S})_{\text{CO}_2}^{(2)} = 0,087 \cdot 10^5 \cdot 3,08 = 0,268 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot \text{м} = 26,8 \text{ кН/м}; \\ (p\bar{S})_{\text{H}_2\text{O}}^{(2)} = 0,170 \cdot 10^5 \cdot 3,08 = 0,524 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot \text{м} = 52,4 \text{ кН/м}. \end{array} \right. \end{array}$$

Значения ϵ_{CO_2} и $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ находим с помощью номограмм

$\epsilon_{\text{CO}_2} = f[T_r, (p\bar{S})_{\text{CO}_2}]$ и $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}} = f_1[T_r, (p\bar{S})_{\text{H}_2\text{O}}]$ [1] при средней температуре газов в зоне:

для зоны 1

$$\epsilon_{\text{CO}_2}^{(1)} = 0,14; \quad \epsilon_{\text{H}_2\text{O}}^{(1)} = 0,26;$$

для зоны 2

$$\epsilon_{\text{CO}_2}^{(2)} = 0,115; \quad \epsilon_{\text{H}_2\text{O}}^{(2)} = 0,21.$$

Поправка на парциальное давление водяных паров $\beta = 1,1$ (выбирается по $p_{\text{H}_2\text{O}} = 0,170 \cdot 10^5$ Па и $(p\bar{S})_{\text{H}_2\text{O}} = 52,4$ кН/м [1]).
Для зон 1 и 2 имеем:

$$\begin{aligned}\epsilon_{\Gamma}^{(1)} &= \beta \epsilon_{\text{H}_2\text{O}}^{(1)} + \epsilon_{\text{CO}_2}^{(1)} = 1,05 \cdot 0,26 + 0,14 = 0,413; \\ \epsilon_{\Gamma}^{(2)} &= \beta \epsilon_{\text{H}_2\text{O}}^{(2)} + \epsilon_{\text{CO}_2}^{(2)} = 1,05 \cdot 0,21 + 0,115 = 0,396.\end{aligned}$$

В итоге:

$$\epsilon_{\Gamma}^{(1)} = 0,413 \quad \text{и} \quad \epsilon_{\Gamma}^{(2)} = 0,336.$$

Определяем характеристики садки и футеровки. Для стали 70К принимаем значения степени черноты (высокоуглеродистая сталь)

$$\epsilon_{\text{M}}^{(1)} = 0,6 \quad \text{и} \quad \epsilon_{\text{M}}^{(2)} = 0,85.$$

Для зон 1 и 2 находим степень развития кладки ω :

$$\omega_i = F_{\text{кл}i} / F_{\text{M}i},$$

где $F_{\text{кл}}^{(1)} = 21,2$ м²; $F_{\text{кл}}^{(2)} = 22$ м²; $F_{\text{M}}^{(1)} = 18$ м²; $F_{\text{M}}^{(2)} = 18$ м².

Находим:

$$\omega_1 = \frac{21,2}{18} = 1,18; \quad \omega_2 = \frac{22}{18} = 1,22.$$

Находим коэффициенты излучения. По формуле [2]

$$C_{\text{пр}i} = \epsilon_{\text{M}i} \epsilon_{\Gamma i} \frac{\frac{1}{\omega_i} (1 - \epsilon_{\Gamma i}) + 1}{\frac{1}{\omega_i} (1 - \epsilon_{\Gamma i}) [\epsilon_{\text{M}i} + \epsilon_{\Gamma i} (1 - \epsilon_{\text{M}i})] + \epsilon_{\text{M}i}} \cdot 5,67 \quad (\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}^4))$$

определяем величину приведенного коэффициента излучения в системе серых тел (кладка – металл – газ):

$$C_{\text{пр}i}^{(1)} = 5,67 \cdot 0,6 \cdot 0,413 \frac{\frac{1}{1,18}(1-0,413)+1}{\frac{1}{1,18}(1-0,413)[0,6+0,413(1-0,6)]+0,413} =$$

$$= 2,69 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4);$$

$$C_{\text{пр}i}^{(2)} = 5,67 \cdot 0,85 \cdot 0,336 \frac{\frac{1}{1,22}(1-0,336)+1}{\frac{1}{1,22}(1-0,336)[0,85+0,336(1-0,85)]+0,336} =$$

$$= 3,07 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

С учетом расклада заготовок расчетный коэффициент теплообмена излучением

$$C_{\text{пр}i}^{\text{расч}} = \frac{2C_{\text{прпов}i} + C_{\text{пр}i}}{3},$$

где $C_{\text{прпов}i}$ – приведенный коэффициент излучения для боковой поверхности заготовки.

Имеем

$$C_{\text{прпов}i} = 5,67 \varepsilon_{\Gamma_i} \varepsilon_{M_i} \frac{1 + \beta_{1i} - \varphi_{M,M}(1 - \varepsilon_{\Gamma_i})}{\beta_{1i} [\varepsilon_{M_i} - \varepsilon_{\Gamma_i}(1 - \varepsilon_{M_i})] + \varepsilon_{\Gamma_i} [1 + \varphi_{M,M}(1 - \varepsilon_{\Gamma_i})(1 - \varepsilon_{M_i})]} \quad (\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)).$$

Записываем

$$\beta_{1i} = \frac{1}{\omega_{M_{\text{пов}i}}} (1 - \varepsilon_{\Gamma_i})(1 - \varphi_{M,M}),$$

где

$$\omega_{M_{пов_i}} = \frac{(\omega_i + 1)(1 + \Psi) + 1}{2} \left(\Psi = \frac{h - x_{2_i}}{x_{2_i}}; \Psi = \frac{2x_{2_i} - x_{2_i}}{x_{2_i}} = 1 \right);$$

$$\varphi_{M, M} = \sqrt{1 + \Psi^2} - \Psi; \quad \varphi_{M, M} = \sqrt{1 + 1^2} - 1 = 1,41 - 1 = 0,41.$$

Для зон печи рассчитываем величину β_1 .

Для зоны I

$$\beta_1^{(1)} = \frac{1}{\omega_{M_{пов_i}}^{(1)}} (1 - \varepsilon_r^{(1)})(1 - \varphi_{M, M}),$$

где $\varepsilon_r^{(1)} = 0,34$; $\varphi_{M, M} = 0,41$. Находим

$$\omega_{M_{пов_i}}^{(1)} = \frac{(\omega^{(1)} + 1)(1 + \Psi) + 1}{2} = \frac{(1,18 + 1)(1 + 1) + 1}{2}; \quad \omega_{M_{пов_i}}^{(1)} = 2,68;$$

$$\omega_{M_{пов_i}}^{(2)} = \frac{(\omega^{(2)} + 1)(1 + \Psi) + 1}{2} = \frac{(1,22 + 1)(1 + 1) + 1}{2}; \quad \omega_{M_{пов_i}}^{(2)} = 2,72.$$

Тогда

$$\beta_1^{(1)} = \frac{1}{2,68} (1 - 0,413)(1 - 0,41) = 0,129.$$

Рассчитываем для зоны 2

$$\beta_1^{(2)} = \frac{1}{2,72} (1 - 0,336)(1 - 0,41) = 0,144.$$

Выполняем подстановку

$$C_{\text{прпов}}^{(1)} = 5,67 \cdot 0,413 \cdot 0,6 \frac{1 + 0,129 - 0,41(1 - 0,413)}{0,129[0,6 - 0,413(1 - 0,6)] + 0,413[1 + 0,41(1 - 0,413)(1 - 0,6)]} =$$

$$= 2,49 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

Находим

$$C_{\text{пр}}^{\text{расч}(1)} = \frac{2 \cdot 2,49 + 2,69}{3} = 2,56 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

Для зоны 2 определяем $C_{\text{прпов}}^{(2)}$

$$C_{\text{прпов}}^{(2)} = 5,67 \cdot 0,336 \cdot 0,85 \frac{1 + 0,167 - 0,41(1 - 0,233)}{0,144[0,85 - 0,336(1 - 0,85)] + 0,336[1 + 0,41(1 - 0,336)(1 - 0,85)]} =$$

$$= 2,96 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

Находим

$$C_{\text{пр}}^{\text{расч}(2)} = \frac{2 \cdot 2,96 + 3,07}{3} = 3,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

К дальнейшему расчету теплообмена принимаем:

$$C_{\text{пр}}^{\text{расч}(1)} = 2,56 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4); \quad C_{\text{пр}}^{\text{расч}(2)} = 3,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$$

Для каждой из зон печи рассчитываем лучистую составляющую теплообмена в системе серых тел.

Расчетная формула имеет вид

$$\alpha_{\text{изл}}^{(1)} = \frac{C_{\text{пр}}^{\text{расч}(1)} \left[\left(\frac{\bar{T}_{\Gamma}^{(1)}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\bar{T}_{\text{М}}^{\text{пов}(1)}}{100} \right)^4 \right]}{\bar{T}_{\Gamma}^{(1)} - \bar{T}_{\text{М}}^{\text{пр}(1)}} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4),$$

где $\bar{T}_r^{(1)}$ – абсолютная средняя температура газов в зоне 1 печи, К;
 $\bar{T}_M^{пов(1)}$ – то же, но по отношению к поверхности металла, К.

Для выбора температур $\bar{T}_r^{(1)}$ и $\bar{T}_M^{пов(1)}$ используется температурный график нагрева металла в зоне 1 печи (рис. 2). В соответствии с рис. 2 рабочее пространство печи стана 150 целесообразно разделить на три зоны: методическая (между сечениями 0 – 0 и 1 – 1); сварочная (между сечениями 1 – 1 и 2 – 2); выдержки (томильная) (между сечениями 2 – 2 и 3 – 3).

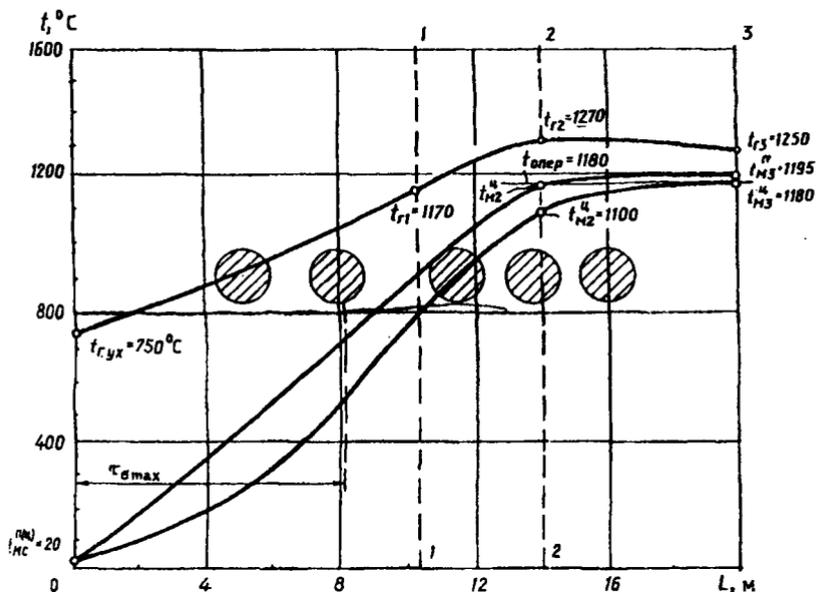


Рис. 2. Температурный график нагрева в печи с шагающими балками стана 150 БМЗ (рассматривать совместно с рис. 1)

Расчетные значения коэффициента излучения (приведенные величины) распределяются по зонам:

зона 1

$$C_{пр1}^{расч} = 2,56 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4);$$

зона 2

$$C_{\text{пр2}}^{\text{расч}} = 3,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4);$$

зона 3

$$C_{\text{пр3}}^{\text{расч}} - C_{\text{пр2}}^{\text{расч}} = 3,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

Производим выбор температур (рис. 2) для зоны 1 печи с шагающими балками стана 150. Имеем:

$$\bar{T}_{\Gamma}^{(1)} = \frac{1170 + 750}{2} = 960 \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad \bar{T}_{\text{М}}^{\text{пов}(1)} = \frac{20 + 920}{2} = 470 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Для зоны 1

$$\alpha_{\text{изл1}} = \frac{2,56 \left[\left(\frac{960 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{470 + 273}{100} \right)^4 \right]}{960 - 470} = 104,83 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Для зоны 2

$$\bar{T}_{\Gamma}^{(2)} = \frac{1170 + 1270}{2} = 1220 \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad \bar{T}_{\text{М}}^{\text{пов}(2)} = \frac{920 + 1180}{2} = 1050 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Имеем

$$\alpha_{\text{изл2}} = \frac{3,0 \left[\left(\frac{1220 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{1050 + 273}{100} \right)^4 \right]}{1220 - 1050} = 336,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Для зоны 3

$$\bar{T}_{\Gamma}^{(3)} = \frac{1270 + 1250}{2} = 1260 \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad \bar{T}_{\text{М}}^{\text{пов}(3)} = \frac{1180 + 1195}{2} = 1187,5 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Находим

$$\alpha_{\text{изл}} = \frac{3,0 \left[\left(\frac{1260 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{1187,5 + 273}{100} \right)^4 \right]}{1260 - 1187,5} = 402,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

ЛИТЕРАТУРА

1. **Металлургические печи. Теория и расчеты: учебник: в 2 т. Т. 1 / В. И. Губинский [и др.]; под общ. ред. В. И. Тимошпольского, В. И. Губинского. – Минск: Беларус. наука, 2007. – 596 с.**
2. **Тепло- и массообмен: учеб. пособие: в 2 ч. Ч. 1 / Б. М. Хрусталева [и др.]; под общ. ред. А. П. Несенчука. – Минск: БНТУ, 2007. – 606 с.**

УДК 621.745

Л. Е. РОВИН, канд. техн. наук (ГГТУ имени П. О. Сухого),
Д. М. КУКУЙ, д-р техн. наук (БНТУ),
С. Л. РОВИН, канд. техн. наук (УП «Технолит»)

ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И МАТЕРИАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ В ЛИТЕЙНОМ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Повышение эффективности работы оборудования, снижение материало- и энергоемкости продукции, сокращение и вторичное использование отходов – важнейшие задачи любого производства.

Металлургия и литейное производство являются одними из самых энерго- и материалоемких отраслей промышленности. Наиболее энергоемкий процесс – плавка. Сокращение удельных энергозатрат на плавку металлов становится все более актуальной задачей в связи с постоянным ростом цен на энергоносители.

Сегодня самым дорогостоящим энергоносителем является электроэнергия. Благодаря непрерывному совершенствованию электроплавильных агрегатов (индукционных и дуговых печей) доля жид-