

УДК 669.16.22:621.793

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ВОЗДУШНЫХ ФУРМ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Радюк А.Г., д.т.н., профессор, вед. научный сотрудник кафедры технологии
и оборудования трубного производства (radjuk@rambler.ru)

Титлянов А.Е., к.т.н., старший научный сотрудник кафедры технологии
и оборудования трубного производства

Сидорова Т.Ю., старший преподаватель кафедры технологии
и оборудования трубного производства (omd-uchsek@ya.ru)

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Методики расчета тепловых потерь и температуры адаптирована применительно к воздушным фурмам доменных печей. С помощью линейной программы в EXCEL исследовано влияние газотермического покрытия и теплоизолирующей вставки на тепловое состояние воздушных фурм. Показано, что наличие вставки оказывает более значительное влияние на снижение тепловых потерь через дутьевой канал, чем нанесение алюминиевого покрытия. Создание воздушного зазора между вставкой и внутренним стаканом приводит к дополнительному снижению тепловых потерь. При этом, чем больше толщина вставки, установленной без зазора в дутьевой канал, тем меньше тепловые потери через дутьевой канал. Если вставка установлена с зазором, то ее толщина практически не влияет на тепловые потери через дутьевой канал.

Ключевые слова: доменная печь, воздушная фурма, дутьевой канал, методика расчета, тепловые потери, температура, газотермическое покрытие, теплоизолирующая вставка, воздушный зазор.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-9-622-627

Воздушные фурмы являются одним из важнейших элементов конструкции доменной печи, определяющих эффективность ее работы: выход фурм из строя влечет за собой необходимость остановки печи для замены разрушенной фурмы. Простой печи по этой причине приводят к существенному снижению выплавки чугуна и увеличению расхода кокса. Кроме того, на воздушные фурмы приходится 30 % всех тепловых потерь в печи [1]. Поэтому проблемы повышения стойкости воздушных фурм и снижения тепловых потерь через их поверхность являются актуальными. При этом в обычных условиях работы доменной печи через рьяльную часть, наружный и внутренний стаканы фурмы поступает соответственно 18, 36 и 46 % [2], а по данным работы [3] 60 % суммарного теплового потока.

В настоящее время проблемы, указанные выше, решаются различными путями: нанесением газотермических покрытий на рабочую поверхность фурмы [4–6], футеровкой огнеупорами со стороны дутьевого канала [7], нанесением жаростойкой обмазки на наружную поверхность фурм [8] и др.

Для дальнейшего поиска путей повышения стойкости воздушных фурм и снижения тепловых потерь через их поверхность целесообразно моделирование теплового состояния воздушных фурм доменных печей [9, 10].

Для этого воспользуемся методикой расчета тепловых потерь через воздушную фурму [11]. В работе использованы формулы стационарной теплопроводности для плоской и цилиндрической стенки [12].

Тепловой поток через поверхность фурмы равен

$$\begin{aligned} Q &= Q_n + Q_p + Q_d = Q_n + Q_{pn} + Q_{pt} + Q_v + Q_{pv} = \\ &= K_n^*(t_r - t_b)H_n + K_{pn}^*(t_r - t_b)(H_{pn} - h_{pt}) + \\ &\quad + K_{pt}(t_r - t_b)S_{pt} + K_v^*(t_d - t_b)H_v + \\ &\quad + K_{pv}^*(t_d - t_b)(H_{pv} - h_{pt}), \text{ Вт,} \end{aligned}$$

где Q_n, Q_p, Q_d – тепловой поток через наружный стакан, рьяльную (снаружи и торца) часть фурмы и со стороны дутьевого канала соответственно, Вт; $Q_{pn}, Q_{pt}, Q_v, Q_{pv}$ – тепловой поток через наружную поверхность рьяльной части, торцевую поверхность рьяльной части, внутренний стакан и рьяльную часть со стороны дутьевого канала соответственно, Вт; $K_n^*, K_{pn}^*, K_v^*, K_{pv}^*$ – условный коэффициент теплопередачи тепла через наружный стакан, наружную поверхность рьяльной части, внутренний стакан фурмы и рьяльную часть со стороны дутьевого канала соответственно, Вт/(м·К); K_{pt} – коэффициент теплопередачи тепла через торцевую поверхность рьяльной части, Вт/(м²·К); t_r, t_d – околофурменная температура в горне и температура горячего дутья со-

ответственно, °C; t_b – температура воды в фурме, °C; H_n, H_b, H_{pn}, H_{pb} – длина наружного стакана, внутренне-го стакана, рыльной части снаружи фурмы и рыльной части со стороны дутьевого канала соответственно, м; h_{pt} – толщина торца рыльной части фурмы, м (рис. 1); S_{pt} – площадь торцевой поверхности рыльной части фурмы, м².

$$K_n^* = 2\pi \left/ \left(\frac{1}{\alpha_{гн} R_n^*} + \sum_{i=1}^m \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{R_{nj}}{R_{nj+1}} + \frac{1}{\lambda_{Cu}} \ln \frac{R_n}{R_n - h_n} + \frac{1}{\alpha_b (R_n - h_n)} \right) \right., \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

где $\alpha_{гн}$ – коэффициент теплоотдачи наружному стакану от газов горна, Вт/(м²·К);

$$R_n^* = R_n + \sum_{i=1}^m h_i, \text{ м}; R_{n1} = R_n^*, \text{ м}; R_{nj} = R_n^* - \sum_{i=1}^{j-1} h_i, \text{ м};$$

$$R_{nj+1} = R_n^* - \sum_{i=1}^j h_i, \text{ м}; j = 1, \dots, m; R_n = \frac{R_{np} + R_{nf}}{2}, \text{ м};$$

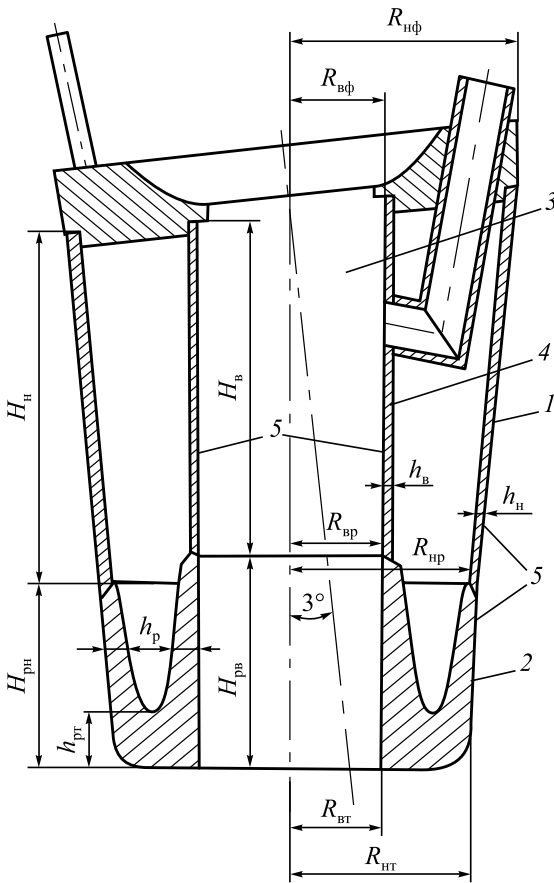


Рис. 1. Продольное сечение воздушной фурмы:

1 – наружный стакан; 2 – рыльная часть; 3 – дутьевой канал; 4 – внутренний стакан; 5 – покрытие

Fig. 1. Longitudinal section of the air tuyere:

1 – outer glass, 2 – tuyere nose, 3 – blow channel, 4 – inside a glass, 5 – coating

R_n – средний радиус наружного стакана со стороны печи, м; R_{np}, R_{nf} – радиус наружного стакана со стороны печи у рыльной части и фланца соответственно, м (рис. 1); h_n, h_i – толщина наружного стакана и i -го материала покрытия соответственно, м (рис. 1); λ_{Cu}, λ_i – коэффициент теплопроводности меди М1 и i -го материала покрытия соответственно, Вт/(м·К); m – количество материалов (слоев) покрытия; α_b – коэффициент теплоотдачи от стенки фурмы к воде, Вт/(м²·К).

$$K_{pn}^* = 2\pi \left/ \left(\frac{1}{\alpha_{гп} R_{pn}^*} + \sum_{i=1}^m \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{R_{pnj}}{R_{pnj+1}} + \frac{1}{\lambda_{Cu}} \ln \frac{R_{pn}}{R_{pn} - h_p} + \frac{1}{\alpha_b (R_{pn} - h_p)} \right) \right., \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

где $\alpha_{гп}$ – коэффициент теплоотдачи рыльной части от газов горна, Вт/(м²·К);

$$R_{pn}^* = R_{pn} + \sum_{i=1}^m h_i, \text{ м}; R_{pn1} = R_{pn}^*, \text{ м}; R_{pnj} = R_{pn}^* - \sum_{i=1}^{j-1} h_i, \text{ м};$$

$$R_{pnj+1} = R_{pn}^* - \sum_{i=1}^j h_i, \text{ м}; j = 1, \dots, m; R_{pn} = \frac{R_{np} + R_{nt}}{2}, \text{ м};$$

R_{pn} – средний радиус рыльной части со стороны печи, м; R_{nt} – радиус рыльной части у торца фурмы, м (рис. 1); h_p – средняя толщина рыльной части без учета толщины торца, м.

$$K_{pt} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{гп}} + \sum_{i=1}^m \frac{h_i}{\lambda_i} + \frac{h_{pt}}{\lambda_{Cu}} + \frac{1}{\alpha_b}}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)},$$

где h_{pt} – толщина торца рыльной части, м.

$$K_b = 2\pi \left/ \left[\frac{1}{\alpha_d R_b^*} + \sum_{i=1}^m \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{R_{bj+1}}{R_{bj}} + \frac{1}{\lambda_{Cu}} \ln \frac{R_b + h_b}{R_b} + \frac{1}{\alpha_b (R_b + h_b)} \right] \right., \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

где α_d – коэффициент теплоотдачи стенке фурмы от горячего дутья, Вт/(м²·К);

$$R_b^* = R_b - \sum_{i=1}^m h_i, \text{ м}; R_{b1} = R_b^*, \text{ м}; R_{bj} = R_b^* + \sum_{i=1}^{j-1} h_i, \text{ м};$$

$$R_{bj+1} = R_b^* + \sum_{i=1}^j h_i, \text{ м}; j = 1, \dots, m; R_b = \frac{R_{bp} + R_{bf}}{2}, \text{ м};$$

R_{bp}, R_{bf} – радиус внутреннего стакана со стороны дутьевого канала у рыльной части и фланца соответственно, м (рис. 1); h_b – толщина внутреннего стакана, м (рис. 1).

$$K_{\text{PB}} = 2\pi \left[\frac{1}{\alpha_{\text{д}} R_{\text{PB}}^*} + \sum_{i=1}^m \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{R_{\text{PB}j+1}}{R_{\text{PB}j}} + \frac{1}{\lambda_{\text{Cu}}} \ln \frac{R_{\text{PB}} + h_{\text{п}}}{R_{\text{PB}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}} (R_{\text{PB}} + h_{\text{п}})} \right], \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)},$$

где

$$R_{\text{PB}}^* = R_{\text{PB}} - \sum_{i=1}^m h_i, \text{ м}; \quad R_{\text{PB}1} = R_{\text{PB}}^*, \text{ м}; \quad R_{\text{PB}j} = R_{\text{PB}}^* + \sum_{i=1}^{j-1} h_i, \text{ м};$$

$$R_{\text{PB}j+1} = R_{\text{PB}}^* + \sum_{i=1}^j h_i, \text{ м}; \quad j = 1, \dots, m; \quad R_{\text{PB}} = \frac{R_{\text{вп}} + R_{\text{вт}}}{2}, \text{ м};$$

$R_{\text{вт}}$ – радиус дутьевого канала у торца фурмы, м (рис. 1);

$$S_{\text{пт}} = \pi (R_{\text{нт}}^2 - R_{\text{вт}}^2).$$

Методика расчета температуры на различных поверхностях воздушной фурмы с использованием формул стационарной теплопроводности через цилиндрическую и плоскую многослойную стенку выглядит следующим образом [12].

• Для наружного стакана:

– температура на поверхности первого слоя покрытия со стороны печи

$$t_{\text{г-1}} = t_{\text{г}} - \frac{K_{\text{н}}^* (t_{\text{г}} - t_{\text{в}})}{2\pi \alpha_{\text{гн}} R_{\text{н}}^*}, \text{ } ^\circ\text{C};$$

– температура на стыке j и $j + 1$ слоев покрытия или слоя покрытия и наружного стакана

$$t_{j,j+1} = t_{\text{г}} - \frac{K_{\text{н}}^* (t_{\text{г}} - t_{\text{в}})}{2\pi} \left(\frac{1}{\alpha_{\text{гн}} R_{\text{н}}^*} + \sum_{i=1}^j \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{R_{\text{н}j}}{R_{\text{н}j+1}} \right), \text{ } ^\circ\text{C};$$

– температура на поверхности наружного стакана со стороны воды

$$t_{\text{н-в}} = t_{\text{в}} + \frac{K_{\text{н}}^* (t_{\text{г}} - t_{\text{в}})}{2\pi \alpha_{\text{в}} (R_{\text{н}} - h_{\text{н}})}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

• Для рывльной части со стороны печи:

– температура на поверхности первого слоя покрытия со стороны печи

$$t_{\text{г-1}} = t_{\text{г}} - \frac{K_{\text{рн}}^* (t_{\text{г}} - t_{\text{в}})}{2\pi \alpha_{\text{гн}} R_{\text{рн}}^*}, \text{ } ^\circ\text{C};$$

– температура на стыке j и $j + 1$ слоев покрытия или слоя покрытия и рывльной части

$$t_{j,j+1} = t_{\text{г}} - \frac{K_{\text{рн}}^* (t_{\text{г}} - t_{\text{в}})}{2\pi} \left(\frac{1}{\alpha_{\text{гп}} R_{\text{рн}}^*} + \sum_{i=1}^j \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{R_{\text{рн}j}}{R_{\text{рн}j+1}} \right), \text{ } ^\circ\text{C};$$

– температура на поверхности рывльной части со стороны воды

$$t_{\text{рн-в}} = t_{\text{в}} + \frac{K_{\text{рн}}^* (t_{\text{г}} - t_{\text{в}})}{2\pi \alpha_{\text{в}} (R_{\text{рн}} - h_{\text{п}})}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

• Для торца рывльной части со стороны печи:

– температура на поверхности первого слоя покрытия со стороны печи

$$t_{\text{г-1}} = t_{\text{г}} - \frac{K_{\text{пт}} (t_{\text{г}} - t_{\text{в}})}{\alpha_{\text{гп}}}, \text{ } ^\circ\text{C};$$

– температура на стыке j и $j + 1$ слоев покрытия или слоя покрытия и рывльной части

$$t_{j,j+1} = t_{\text{г}} - K_{\text{пт}} (t_{\text{г}} - t_{\text{в}}) \left(\frac{1}{\alpha_{\text{гп}}} + \sum_{i=1}^j \frac{h_i}{\lambda_i} \right), \text{ } ^\circ\text{C};$$

– температура на поверхности рывльной части со стороны воды:

$$t_{\text{пт-в}} = t_{\text{в}} + \frac{K_{\text{пт}} (t_{\text{г}} - t_{\text{в}})}{\alpha_{\text{в}}}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

• Для внутреннего стакана:

– температура на поверхности первого слоя покрытия со стороны дутьевого канала:

$$t_{\text{д-1}} = t_{\text{д}} - \frac{K_{\text{в}}^* (t_{\text{д}} - t_{\text{в}})}{2\pi \alpha_{\text{д}} R_{\text{в}}^*}, \text{ } ^\circ\text{C};$$

– температура на стыке j и $j + 1$ слоев покрытия или слоя покрытия и внутреннего стакана

$$t_{j,j+1} = t_{\text{д}} - \frac{K_{\text{в}}^* (t_{\text{д}} - t_{\text{в}})}{2\pi} \left(\frac{1}{\alpha_{\text{д}} R_{\text{в}}^*} + \sum_{i=1}^j \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{R_{\text{в}j+1}}{R_{\text{в}j}} \right), \text{ } ^\circ\text{C};$$

– температура на поверхности внутреннего стакана со стороны воды

$$t_{\text{в-в}} = t_{\text{в}} + \frac{K_{\text{в}}^* (t_{\text{д}} - t_{\text{в}})}{2\pi \alpha_{\text{в}} (R_{\text{в}} + h_{\text{в}})}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

• Для рывльной части со стороны дутьевого канала:

– температура на поверхности первого слоя покрытия со стороны дутьевого канала:

$$t_{\text{д-1}} = t_{\text{д}} - \frac{K_{\text{рв}}^* (t_{\text{д}} - t_{\text{в}})}{2\pi \alpha_{\text{д}} R_{\text{рв}}^*}, \text{ } ^\circ\text{C};$$

– температура на стыке j и $j + 1$ слоев покрытия или слоя покрытия и рывльной части

$$t_{j,j+1} = t_{\text{д}} - \frac{K_{\text{рв}}^* (t_{\text{д}} - t_{\text{в}})}{2\pi} \left(\frac{1}{\alpha_{\text{д}} R_{\text{рв}}^*} + \sum_{i=1}^j \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{R_{\text{рв}j+1}}{R_{\text{рв}j}} \right), \text{ } ^\circ\text{C};$$

– температура на поверхности рывльной части со стороны воды

$$t_{\text{рв-в}} = t_{\text{в}} + \frac{K_{\text{рв}}^*(t_{\text{д}} - t_{\text{в}})}{2\pi\alpha_{\text{в}}(R_{\text{рв}} - h_{\text{п}})}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

По методикам расчета тепловых потерь через поверхность фурмы и температуры была составлена линейная программа в EXCEL. С помощью этой программы был проведен расчет тепловых потерь через поверхность воздушной фурмы и температуры на деталях фурмы* для условий доменной печи № 5 ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат». Были использованы значения коэффициентов теплоотдачи, определенные расчетным путем по экспериментальным данным [13].

Принимаем $t_{\text{г}} = 1600 \text{ } ^\circ\text{C}$; $t_{\text{д}} = 1150 \text{ } ^\circ\text{C}$; $t_{\text{в}} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$; $h_{\text{н}} = 7,0 \text{ мм}$; $h_{\text{п}} = 16,0 \text{ мм}$; $h_{\text{пр}} = 45,0 \text{ мм}$; $h_{\text{в}} = 5,0 \text{ мм}$; $h_1 = 1,5 \text{ мм}$; $\lambda_{\text{Cu}} = 415,6562 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $\lambda_1 = 29,8891 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $\alpha_{\text{гн}} = \alpha_{\text{гп}} = 133,745 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$; $\alpha_{\text{д}} = 465,2 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$; $\alpha_{\text{в}} = 5815 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$; $R_{\text{нр}} = 154 \text{ мм}$; $R_{\text{нф}} = 185 \text{ мм}$; $R_{\text{нт}} = 140 \text{ мм}$; $R_{\text{вп}} = 72,5 \text{ мм}$; $R_{\text{вф}} = 72,5 \text{ мм}$; $R_{\text{вт}} = 72,5 \text{ мм}$; $H_{\text{н}} = 305 \text{ мм}$; $H_{\text{рн}} = 145 \text{ мм}$; $H_{\text{рв}} = 167 \text{ мм}$; $H_{\text{в}} = 283 \text{ мм}$.

В связи с тем, что все более широкое применение находит теплоизоляция внутренней поверхности дутьевого канала [14, 15], было исследовано влияние толщины теплоизоляционной вставки на тепловые потери через поверхность дутьевого канала и температуру вставки и внутреннего стакана, а также получено распределение температуры от водоохлаждаемой полости фурмы до дутьевого канала (рис. 2 – 4).

Для сравнения рассчитаны тепловые потери через дутьевой канал с алюминиевым газотермическим покрытием. Из рис. 2 видно, что наличие вставки оказывает более значительное влияние на снижение теп-

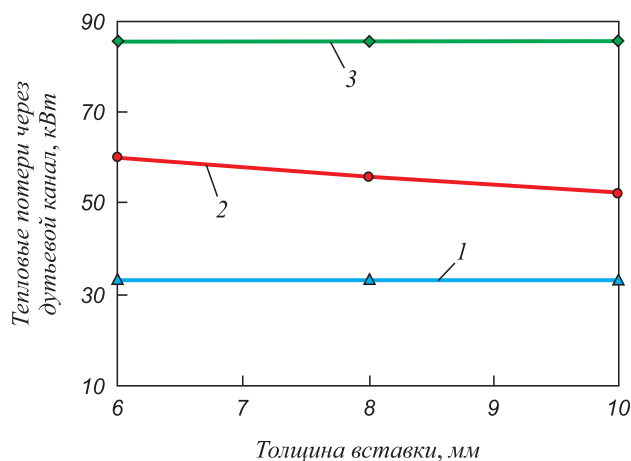


Рис. 2. Зависимость тепловых потерь через дутьевой канал от толщины вставки:

1 - $h_{\text{воз}} = 0,6 \text{ мм}$; 2 - $h_{\text{воз}} = 0 \text{ мм}$; 3 - $h_{\text{Al}} = 1,5 \text{ мм}$; $\lambda_{\text{вст.}} = 3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $\lambda_{\text{воз.}} = 0,0362 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $\lambda_{\text{Al}} = 29,8891 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$

Fig. 2. Dependence of the heat loss through the blow channel on the insert thickness:

1 - $h_{\text{air}} = 0.6 \text{ мм}$; 2 - $h_{\text{air}} = 0 \text{ мм}$; 3 - $h_{\text{Al}} = 1.5 \text{ мм}$; $\lambda_{\text{insert}} = 3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$; $\lambda_{\text{air}} = 0.0362 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$; $\lambda_{\text{Al}} = 29.8891 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

* В работе принимала участие Н.Л. Кириллова.

ловых потерь через дутьевой канал, чем нанесение алюминиевого покрытия. Создание воздушного зазора между ней и внутренним стаканом приводит к дополнительному снижению тепловых потерь. При этом, чем больше толщина вставки, установленной без зазора в

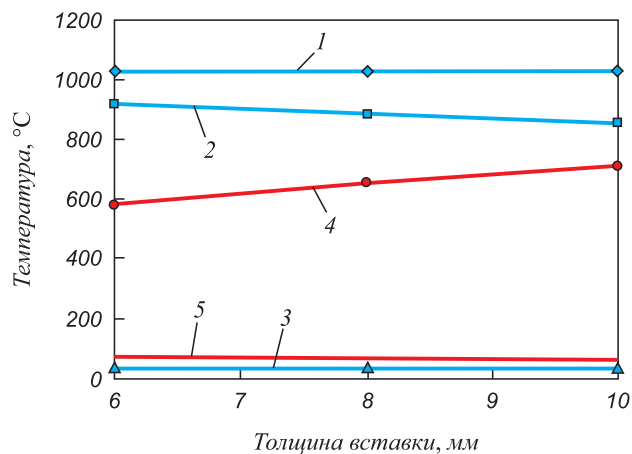


Рис. 3. Влияние толщины вставки на температуру:

1, 4 – вставки со стороны дутьевого канала; 2 – вставки со стороны воздушного зазора; 3 – внутреннего стакана со стороны воздушного зазора; 5 – на границе вставки и внутреннего стакана; 1 - 3 - $h_{\text{воз.}} = 0,6 \text{ мм}$; 4, 5 - $h_{\text{воз.}} = 0 \text{ мм}$; $\lambda_{\text{вст.}} = 3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $\lambda_{\text{воз.}} = 0,0362 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$

Fig. 3. Influence of the insert thickness on a temperature:

1, 4 – inserts from the side of the blow channel, 2 – inserts from the side of air gap, 3 – inside a glass from the side of air gap, 5 – on the border of the insert and inside glass;

1 - 3 - $h_{\text{air}} = 0.6 \text{ мм}$; 4, 5 - $h_{\text{air}} = 0 \text{ мм}$; $\lambda_{\text{insert}} = 3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$; $\lambda_{\text{air}} = 0.0362 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

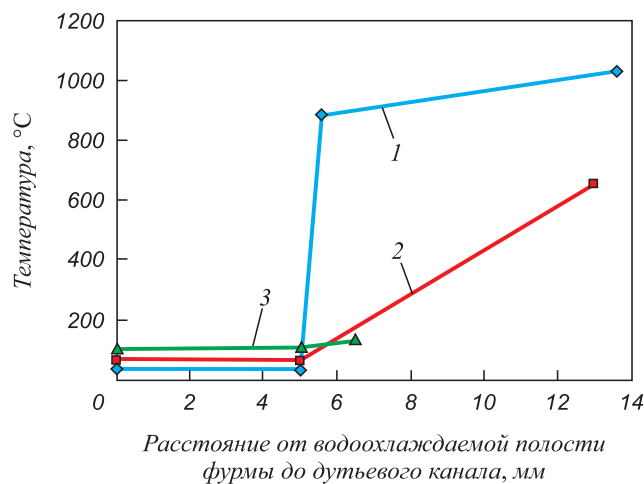


Рис. 4. Распределение температуры от водоохлаждаемой полости фурмы до дутьевого канала:

$h_{\text{в}} = 5 \text{ мм}$; 1 - $h_{\text{воз.}} = 0,6 \text{ мм}$, $h_{\text{вст.}} = 8 \text{ мм}$; 2 - $h_{\text{воз.}} = 0 \text{ мм}$, $h_{\text{вст.}} = 8 \text{ мм}$; 3 - $h_{\text{Al}} = 1,5 \text{ мм}$; $\lambda_{\text{вст.}} = 3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $\lambda_{\text{воз.}} = 0,0362 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $\lambda_{\text{Al}} = 29,8891 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$

Fig. 4. Temperature distribution from water-cooled tuyere hollow to the blow channel:

1 - $h_{\text{air}} = 0.6 \text{ мм}$, $h_{\text{insert}} = 8 \text{ мм}$; 2 - $h_{\text{air}} = 0 \text{ мм}$, $h_{\text{insert}} = 8 \text{ мм}$; 3 - $h_{\text{Al}} = 1.5 \text{ мм}$; $\lambda_{\text{insert}} = 3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$; $\lambda_{\text{air}} = 0.0362 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$; $\lambda_{\text{Al}} = 29.8891 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

дутьевой канал, тем меньше тепловые потери через дутьевой канал. Если вставка установлена с зазором, то ее толщина практически не влияет на тепловые потери через дутьевой канал.

Из рис. 3 видно, что воздушный зазор между вставкой и внутренним стаканом оказывает существенное влияние на их температуру. Так, при отсутствии зазора, температура вставки со стороны дутьевого канала растет с увеличением толщины вставки, а при наличии зазора толщина вставки практически не влияет на ее температуру со стороны дутьевого канала. Следует отметить, что при наличии зазора температура внутреннего стакана с его стороны ниже, чем температура на границе вставки и внутреннего стакана при отсутствии зазора между ними.

Согласно рис. 4, наблюдается резкий градиент температуры в воздушном зазоре между вставкой и внутренним стаканом из-за его низкой теплопроводности, благодаря чему температура вставки выше, а внутреннего стакана ниже, чем при отсутствии зазора между ними. С точки зрения стойкости вставки, большой градиент температур по ее толщине при отсутствии зазора может привести к появлению в ней высоких термоупругих напряжений, способствующих ее разрушению.

Выводы. Методики расчета тепловых потерь и температуры адаптированы применительно к воздушным фурмам доменных печей. С помощью линейной программы в EXCEL исследовано влияние газотермического покрытия и теплоизолирующей вставки на тепловое состояние воздушных фурм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бородулин А.В. Научные основы рационального использования энергетических ресурсов в доменном производстве: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Екатеринбург, 1994. – 46 с.
2. Бородулин А.В., Васильев А.П., Глушенко Е.Л. и др. Об информативности тепловых потерь рабочего пространства доменных печей // Тр. II Междунар. науч.-практич. конф. «Автоматизиро-

- ванные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии». – М., 2002. С. 424 – 426.
3. Бондаренко А.А., Горбик А.С., Дышлевич Г.Г. Исследование теплонапряженности различных участков фурм // *Сталь*. 1983. № 7. С. 11 – 12.
 4. Пат. 2215043 РФ. МКИ С21В7/16. Способ подготовки к работе фурмы доменной печи / В.Н. Григорьев, Г.И. Урбанович, Е.Г. Урбанович и др.; заявл. 11.12.01; опубл. 27.10.02. Бюл. № 30.
 5. Пат. 2387716 РФ. С21В7/16. Способ подготовки фурмы доменной печи / А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов, С.С. Ляпин и др.; заявл. 27.03.08; опубл. 27.04.10. Бюл. № 12.
 6. Пат. 2465333 РФ. С21В7/16. Способ подготовки к работе воздушной фурмы доменной печи / А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов, Д.С. Васильев и др.; заявл. 04.02.11; опубл. 27.10.12. Бюл. № 30.
 7. А.с. 159870 СССР. МПК С21В. Дутьевая фурма доменной печи с огнеупорной вставкой / Е.Д. Багрецов, Ю.И. Ружальский; заявл. 03.12.1962; опубл. 14.01.1964. Бюл. № 2.
 8. Пат. 2491351 РФ. С21В7/16. Способ подготовки к работе воздушной фурмы доменной печи / А.Г. Радюк, А.Е. Титлянов, Л.В. Радюк; заявл. 15.03.12; опубл. 27.08.13. Бюл. № 32.
 9. Жук В.И. Анализ тепловой работы воздушных фурм доменной печи // *Вестник приазовского государственного технического университета*. 2002. Вып. 12. С. 25 – 30.
 10. Лавров В.В., Спиринов Н.А., Рыболов В.Ю. Модельное исследование температуры стенки воздушной фурмы доменной печи // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2000. № 2. С. 46 – 49.
 11. Пат. 2235789 РФ. МКИ С21В7/16. Дутьевая фурма доменной печи и способ нанесения защитного покрытия на дутьевую фурму доменной печи / А.Г. Маншилин, Е.Н. Складановский, В.И. Нецветов и др.; заявл. 04.11.02; опубл. 27.05.04. Бюл. № 15.
 12. Кутателадзе С.С., Борицанский В.М. Справочник по теплопередаче. –Л. –М.: Госэнергоиздат, 1959. – 414 с.
 13. Кириллова Н.Л., Радюк А.Г., Горбатюк С.М. и др. Расчет коэффициентов теплоотдачи поверхностям воздушной фурмы доменной печи от горна и горячего дутья // *Современные проблемы гуманитарных и естественных наук: Матер. XIII Междунар. науч.-практич. конф. 21–22 декабря 2012 г. В 2-х т. Т. 1.* – М.: Спецкнига, 2012. С.132 – 135.
 14. Кириллова Н.Л., Радюк А.Г., Титлянов А.Е. Снижение тепловых потерь через поверхность воздушных фурм доменных печей // *Металлург*. 2013. № 10. С. 28 – 31.
 15. Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Кириллова Н.Л. Применение вставки из углеродной ткани для теплоизоляции поверхности воздушных фурм доменных печей // *Черная металлургия. Бюл. инта «Черметинформация»*. 2015. № 3. С. 38 – 41.

Поступила 26 февраля 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. No. 9, pp. 622–627.

MODELING OF THE THERMAL STATE OF AIR TUYERES FOR BLAST FURNACES

A.G. Radyuk, A.E. Titlyanov, T.Yu. Sidorova

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS),
Moscow, Russia

Abstract. The calculation methods of heat losses and temperature were adapted to the air tuyeres for blast furnaces. The influence of gas-thermal coatings and insulating paste on the thermal condition of the air tuyeres was investigated with the help of a linear program in EXCEL. It is shown that the presence of the inserts has a greater impact on reducing heat loss through the blow channel than the application of aluminum coatings. The creation of the air gap between the insert and the inner glass leads to a further reduction of heat loss. Thus, the greater thickness of the insert installed without a gap in the blow channel leads to the less heat

loss through the blow channel. If the insert is installed with a gap, its thickness almost does not effect on the heat loss through the blow channel.

Keywords: blast furnace, air tuyere, blow channel, calculation method, heat loss, temperature, gas-thermal coating, thermal insulation paste, air gap.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-9-622-627

REFERENCES

1. Borodulin A.V. *Nauchnye osnovy ratsional'nogo ispol'zovaniya energeticheskikh resursov v domennom proizvodstve: Avtoref. diss. d-ra tekhn. nauk* [Scientific bases of rational use of energy resources in blast-furnace production: Extended Abstract of Cand. Dr. Sci. Diss.]. Ekaterinburg, 1994, 46 p. (In Russ.).

2. Borodulin A.V., Vasil'ev A.P., Glushchenko E.L. etc. On the issue of the informational content of heat loss at operating area of blast furnace. In: *Materialy 2-oi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Avtomatizirovannye pechnye agregaty i energosberegayushchie tekhnologii v metallurgii"*. Moskva. 3–5 dekabrya 2002 g. [Materials of the 2nd International Scientific and Practical Conference "Automated Furnace Units and Energy Saving Technologies in Metallurgy". Moscow. December 3–5, 2002]. pp. 424–426. (In Russ.).
3. Bondarenko A.A., Gorbik A.S., Dyshevich G.G. The study of heat stress of different parts of the tuyeres. *Stal'*. 1983, no. 7, pp. 11–12. (In Russ.).
4. Grigor'ev V.N., Urbanovich G.I., Urbanovich E.G. etc. *Sposob podgotovki k rabote furmy domennoi pechi* [Method of preparation for work of blast furnace tuyere]. Patent RF no. 2215043, MKI S21V7/16. *Byulleten' izobretenii*. 2002, no. 30. (In Russ.).
5. Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Lyapin S.S. etc. *Sposob podgotovki furmy domennoi pechi* [The method of preparing the tuyere of a blast furnace]. Patent RF no. 2387716, S21V7/16. *Byulleten' izobretenii*. 2010, no. 12. (In Russ.).
6. Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Vasil'ev D.S. etc. *Sposob podgotovki k rabote vozduшной furmy domennoi pechi* [Method of preparation for work of the air tuyere of blast furnace]. Patent RF no. 2465333, S21V7/16. *Byulleten' izobretenii*. 2012, no. 30. (In Russ.).
7. Bagretsov E.D., Ruzhal'skii Yu.I. *Dut'evaya furma domennoi pechi s ognepornoj vstavkoi* [Blast tuyere of a blast furnace with a refractory insert]. Certificate of authorship USSR no. 159870. MPK S21V. *Byulleten' izobretenii*. 1964, no. 2. (In Russ.).
8. Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Radyuk L.V. *Sposob podgotovki k rabote vozduшной furmy domennoi pechi* [Method of preparation for work of the air tuyere of blast furnace]. Patent RF no. 2491351, S21V7/16. *Byulleten' izobretenii*. 2012, no. 32. (In Russ.).
9. Zhuk V.I. Analysis of thermal operation of the air tuyeres of the blast furnace. *Vestnik priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2002. Issue 12, pp. 25–30. (In Russ.).
10. Lavrov V.V., Spirin N.A., Rybolovlev V.Yu. A model study of the wall temperature of the air tuyere of blast furnace. *Izvestiya VUZov Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2000, no. 2, pp. 46–49. (In Russ.).
11. Manshilin A. G., Skladanovskii E. N., Netsvetov V. I. etc. *Dut'evaya furma domennoi pechi i sposob nanoseniya zashchitnogo pokrytiya na dut'evuyu furmu domennoi pechi* [Blast tuyere of a blast furnace and a method of applying a protective coating on the blast tuyere of a blast furnace]. Patent RF no. 2235789. MKI S21V7/16. *Byulleten' izobretenii*. 2004, no. 15. (In Russ.).
12. Kutateladze S.S., Borishchanskii V.M. *Spravochnik po teploperedache* [Heat transfer: Handbook]. Leningrad–Moscow: Gosenergoizdat, 1959, 414 p. (In Russ.).
13. Kirillova N.L., Radyuk A.G., Gorbatyuk S.M. etc. Calculation of coefficients of heat transfer to surfaces of the air tuyere of a blast furnace from the hearth and hot blast. In: *Sovremennye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk: materialy XIII mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii 21–22 dekabrya 2012 g. v 2 t., t. I* [Modern problems of Arts and Sciences: Proceedings of XIII International Scientific and Practical Conference on December 21–22, 2012, in 2 vols., vol. I]. Moscow: Izd-vo "Spetskniga", 2012, pp. 132–135. (In Russ.).
14. Kirillova N.L., Radyuk A.G., Titlyanov A.E. Reducing heat loss through the surface of blast-furnace tuyeres. *Metallurgist*. 2014, vol. 57, no. 9–10, pp. 878–882.
15. Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Kirillova N.L. The use of panels of carbon fabric for insulation of the surface of air tuyeres of blast furnaces. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2015, no. 3, pp. 38–41. (In Russ.).

Information about the authors:

A.G. Radyuk, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Leading Researcher of the Chair "Technology and Equipment for Pipe Production"

(radjuk@rambler.ru)

A.E. Titlyanov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Chair "Technology and Equipment for Pipe Production"

T.Yu. Sidorova, Senior Lecturer of the Chair "Technology and Equipment for Pipe Production" (omd-uchsek@ya.ru)

Received February 26, 2016