

А.А.Сохацкий, И.А.Лукьяненко, Г.Т.Цыганков, А.Л.Чайка,
А.Г.Шевелев

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОБМЕНА И ГАЗОДИНАМИКИ В ВЕРХНЕЙ ЗОНЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОЙ РАБОТЫ ОГРАЖДЕНИЯ

Рассмотрена задача процессов теплообмена и газодинамики, происходящих в сухой зоне доменной печи, и представлено ее решение. Это двумерная, осесимметрическая, стационарная математическая модель для двухфазных сред. Исследуется влияние тепловых потерь рабочего пространства, которые обусловлены вынужденным охлаждением, и влияние неравномерности порозности слоя шихты на процессы, которые протекают в двухфазной среде печи.

Постановка задачи. Процессы теплообмена и газодинамики в периферийной зоне доменной печи оказывают существенное влияние на энергоемкость выплавки чугуна, а также на техническую надежность печи [1–3]. Исследования этих процессов с помощью математических моделей с использованием информации о тепловых потерях рабочего пространства доменных печей перспективны как для выбора конструкции профиля печи и работы ее системы охлаждения, так и для организации дутьевого режима и загрузки.

Целью исследования является обеспечения надежной, долговечной, непрерывной и безаварийной работы системы ограждения и печи в целом с учетом теплогазодинамического режима работы печи, степени износа футеровки, интенсивности охлаждения и образования накипи на стенках трубок холодильников, материала тела холодильников и выхода их из строя и др. Исследуются влияние распределения шихтовых материалов в печи (в частности по радиусу) на закономерности процессов газодинамики и теплообмена во всем объеме рассматриваемой зоны печи с использованием информации о техническом состоянии и тепловой работе системы ограждения печи.

Методика исследования. Совместная стационарная осесимметричная задача газодинамики и теплообмена периферийной зоны доменной печи с учетом работы ее системы водяного охлаждения (рис.1) рассматривается в следующей постановке:

Слой твердых частиц (шихта) с заданной температурой $T_s|_{x=0}$ на верхней границе рассматриваемой области (колошник) движется вертикально вниз со скоростью $u_s(x)$. Скорость движения шихты определяется производительностью печи и является известной величиной. Через нижнюю границу рассматриваемой области противотоком к твердой фазе движется газ с известной температурой $T_g|_{x=H} > T_g|_{x=0}$ и массовым расходом M_g . Часть печи охлаждается водяными холодильниками, расположенными по пери-

метру. На верхней границе (колошник) поддерживается постоянное давление газа $p_0 = \text{const}$. В общем случае порозность слоя твердых частиц (доля пустот) определяется зависимостью $\varepsilon = V_g / (V_g + V_s)$, где V_g , V_s объем газа и шихты соответственно. В общем случае порозность слоя неравномерна и определяется способом загрузки, а также фрикционным составом частиц.

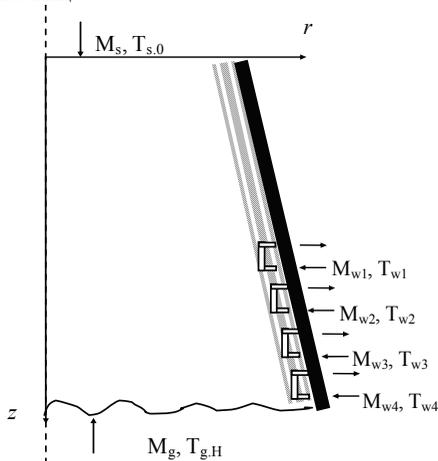


Рис. 1. Схема элемента зоны доменной печи, где M_{w_i} , T_{w_i} массовый расход и температура воды на входе в холодильники каждого из рядов охлаждения

поднимающегося к колошнику;

2. радиальная составляющая скорости газа v_g мала по сравнению с осевой скоростью газа u_g ($v_g < u_g$), следовательно, ею пренебрегаем;
3. конвективные члены в уравнении движения газа малы по сравнению с силой сопротивления, при течении через слой твердых частиц и ими также пренебрегаем;
4. пренебрегаем молекулярным переносом тепла в газе по сравнению с конвективным переносом тепла;
5. также пренебрегаем молекулярным переносом тепла в шихте в осевом направлении по сравнению с радиальным переносом тепла.

Приведенное описание математической модели основано на интегральных уравнениях баланса массы и дифференциальных уравнениях количества движения и баланса тепла газа и твердых частиц, а также уравнении баланса тепла между рабочим пространством печи и системой охлаждения, которые приведены ниже. Сила сопротивления при прохождении газа через слой описывалась зависимостью Эргана [4]. В общем случае решение этих уравнений сопряжено с рядом трудностей. Однако

Отметим ряд особенностей и допущений, использованных при рассмотрении процессов теплообмена и газодинамики в сухой зоне печи. В этой зоне характерна не зависимость газораспределения от способа подвода дутья. Профиль осевой скорости газа u_g стабилизируется и определяется структурой слоя, сформированной при загрузке шихты.

В рамках рассмотренной математической модели использованы следующие допущения:

1. эффект химических реакций несущественен и не влияет на температуру газа,

существование основного направления движения фаз и различия теплофизических свойств шихты и газа позволяют упростить исходные уравнения и записать их в приближении «узкого канала».

Результаты исследования.

С учетом принятых допущений математическая модель теплообмена и газодинамики в цилиндрических координатах для печи конусной формы с радиусом колошника R_0 имеет следующий вид:

$$\varepsilon \frac{\partial p}{\partial z} = - \left[150 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon \cdot d_s \cdot \Phi_s} \mu_g + 1,75 \cdot \rho_g \cdot |u_g - u_s| \right] \frac{1 - \varepsilon}{d_s \cdot \Phi_s} (u_g - u_s) + \frac{1}{r \cdot \Phi_w^2(z)} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu_g \cdot r \frac{\partial u_g}{\partial r} \right); \quad (1)$$

$$M_g = 2\pi \int_0^{R_{bf}} \rho_g \cdot u_g \cdot \varepsilon \cdot \Phi_w^2 \cdot r \cdot dr = const; \quad (2)$$

$$p = \rho_g R_g (T_g + 273); \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} [\rho_g \cdot u_g \cdot C_g \cdot T_g \cdot \varepsilon \cdot \Phi_w^2] = \Phi_w^2 \cdot K_v \cdot (T_s - T_g); \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} [\rho_s \cdot u_s \cdot C_s \cdot T_s \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \Phi_w^2] = \Phi_w^2 \cdot K_v \cdot (T_g - T_s) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[(1 - \varepsilon) \cdot \lambda_s \cdot r \cdot \frac{\partial T_s}{\partial r} \right]; \quad (5)$$

$$M_s = 2\pi \int_0^{R_{bf}} \rho_s \cdot u_s \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \Phi_w^2 \cdot r \cdot dr = const; \quad (6)$$

где $\Phi_w(z) = 1 + \beta \cdot z = 1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{R_0} \cdot z$, α – угол конусности шахты печи; R_0 –

радиус верхней границы; $\beta = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{R_0}$.

Граничные условия приведенной системы уравнений (1)–(6) имеют следующий вид:

$$p|_{z=0} = p_0, \quad T_g|_{z=H} = T_{g,H}, \quad T_s|_{z=0} = T_{s,0}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad - (1 - \varepsilon) \lambda_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial r} \Big|_{r=R_{bf}} = q_w(z); \quad (8)$$

$$\left. \frac{\partial u_g}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad u_g \Big|_{r=R_{bf}} = 0, \quad (9)$$

где μ_g – динамический коэффициент вязкости газа; d_s и Φ_s – средний диаметр и коэффициент формы твердых частиц соответственно; M_g и M_s – массовые расходы газа и шихты; R_g – газовая постоянная; C_g и C_s – теплоемкости газа и шихты; K_v – объемный коэффициент теплоотдачи; λ_{eff} – эффективный коэффициент теплопроводности пристеночного слоя шихты; λ_s – коэффициент теплопроводности твердых частиц, R_{bf} текущий радиус печи.

В математическую модель (1)–(9) включено рассмотрение процесса теплообмена между внутренним пространством печи и системой охлаждения домы. Для каждого горизонтального ряда холодильников составляется уравнение баланса тепла, поступающего от внутреннего пространства печи к охлаждающей жидкости (воды). Система холодильников моделируется кольцевым каналом, высота которого и ширина щели равны высоте холодильника и диаметру его трубок. На входе в кольцевой канал задаются значения массового расхода воды и ее начальной температуры. Конструктивные особенности холодильников учитывают, задавая соответствующее значение коэффициента теплоотдачи от стенок холодильника к охлаждающей воде. Уравнение теплового баланса для воды имеет следующий вид:

$$\frac{\partial T_w}{\partial z} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_0 \cdot \Phi_w^2}{M_w \cdot C_w \cdot \left[\left(\frac{h}{\lambda} \right)_p + \left(\frac{h}{\lambda} \right)_c + \frac{1}{\alpha_w} \right]} \left(T_w - T_s \Big|_{r=R_{bf}} \right), \quad (10)$$

где α_w – коэффициент теплоотдачи от стенок холодильника к воде; h_p , λ_p и h_c , λ_c – толщина и коэффициент теплопроводности футеровки и стенок холодильника соответственно; M_w – массовый расход воды, подаваемой на охлаждение рассматриваемого горизонтального ряда холодильников; C_w и T_w – массовая теплоемкость и температура воды.

Данное уравнение (10) рассматривается совместно с предыдущей системой уравнений (1) – (9). В качестве краевого условия задаются температура воды и ее массовый расход на входе в холодильники каждого из рядов охлаждения:

$$T_w \Big|_{z=z(i)} = (T_w)_i, \quad M_w \Big|_{z=z(i)} = (M_w)_i, \quad i = 1, N_c, \quad (11)$$

где N_c – число горизонтальных рядов охлаждения на рассматриваемом участке печи; $(T_w)_i$ – температура воды на входе в холодильники ряда с номером i .

Математическая модель периферийной зоны шахты (1)–(11) была использована для расчета тепло–газодинамического состояния доменной

печи объемом 1033 м^3 и производительностью 125 т/ч чугуна, а также предполагалось, что холодильники расположены по всей высоте печи.

Результаты вычислений, проведенные методом конечных разностей для 4 вариантов распределения порозности по радиусу печи (рис.2), позволили получить тепло–газодинамические поля о состоянии сухой зоны и поле температур системы ограждения домны.

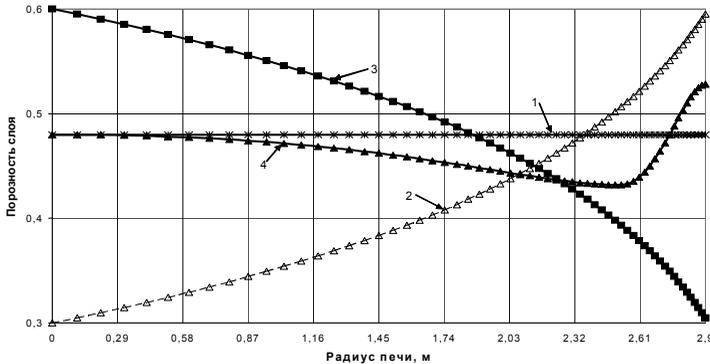


Рис. 2. Варианты распределения порозности по радиусу на колошнике печи: 1 – порозность постоянна; 2 – периферийный ход; 3 – центральный ход; 4 – вариант наиболее приближенный к практике доменного производства

На приведенных рис.3,5(а–г) слева расположена ось печи, справа охлаждаемая многослойная стенка печи. На колошнике (верхняя граница рассматриваемой области) задавалась температура загрузки шихты (1500°C) при некотором постоянном давлении газа ($1,693$ ати). На нижней границе температура газа (1200°C).

Распределение температуры шихты для 4–х вариантов распределения порозности приведено на рис.3(а–г). На представленных рисунках показано: белым цветом – высокотемпературные области, черным – области с низким распределением температур. Из рис.3(а–г) видно, что для различных случаев распределение материалов в печи поле температур разное. Это объясняется различным газораспределением, которое обеспечивает различный прогрев шихтовых материалов. Из рис.3(а–г) видно, что возле стенки печи температура падает, это объясняется влиянием работы системы охлаждения, которая хоть и не оказывает влияние на формирование поля температур печи в целом, но формирует перепад температур достигающий 200°C и более в слое толщиной около 300 мм , что хорошо отображается на рис.4(а–г). Охлаждение шахты до колошника может приводить к тому, что на нижние горизонты печи шихта будет приходить недостаточно прогретой, и на рис.4(в) хорошо видно, что произошло похолодание на периферии, причем на некоторых горизонтах температура шихты упала ниже загружаемой температуры. Все это может ухудшить

техническую надежность ограждения печи и снизить ее технико-экономические показатели.

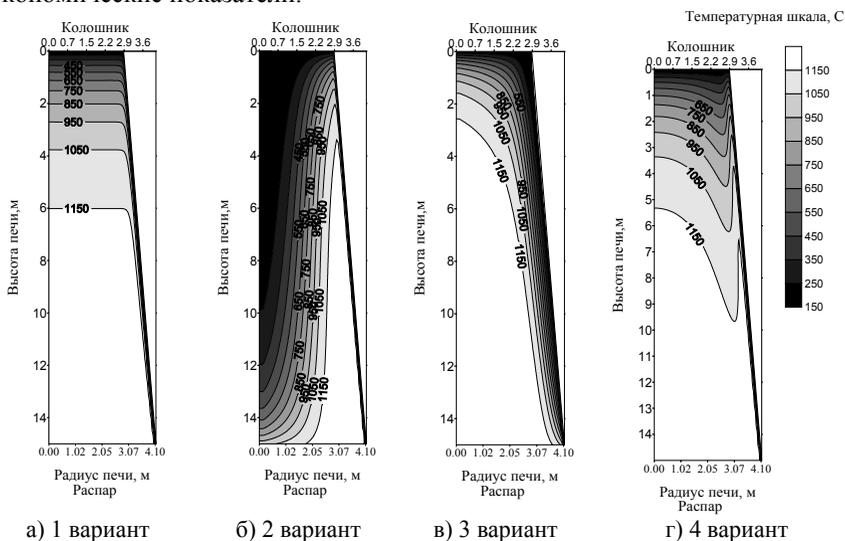


Рис. 3. Распределение температуры шихты на рассматриваемом участке печи для различных вариантов распределения порозности шихты по радиусу

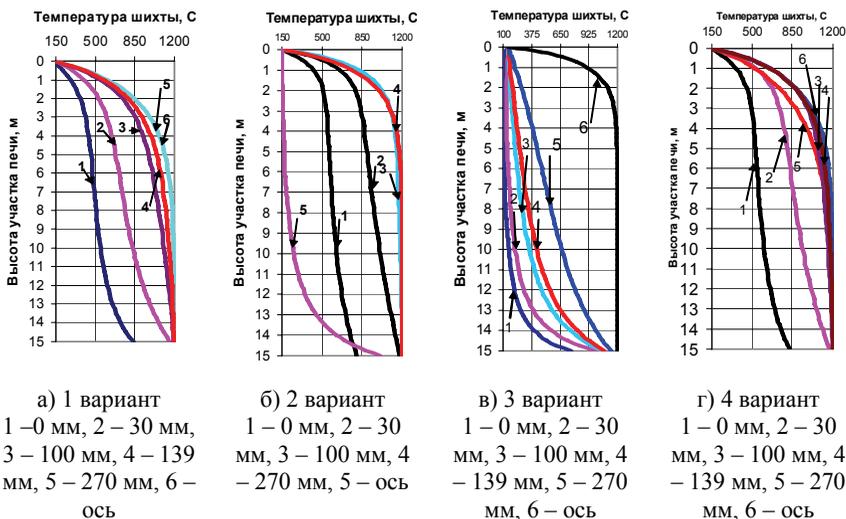


Рис. 4. Температура шихты по высоте участка печи на различных расстояниях (r) от стенки (мм) для различных вариантов распределения порозности шихты по радиусу

Газодинамические параметры также являются одной из важнейшей характеристикой работы печи, существенно влияющей на тепломассообменные процессы в домне. По изменению величин осевой скорости газа (рис.5,а–г) можно судить о распределении шихтовых материалов в печи и о ее ходе.

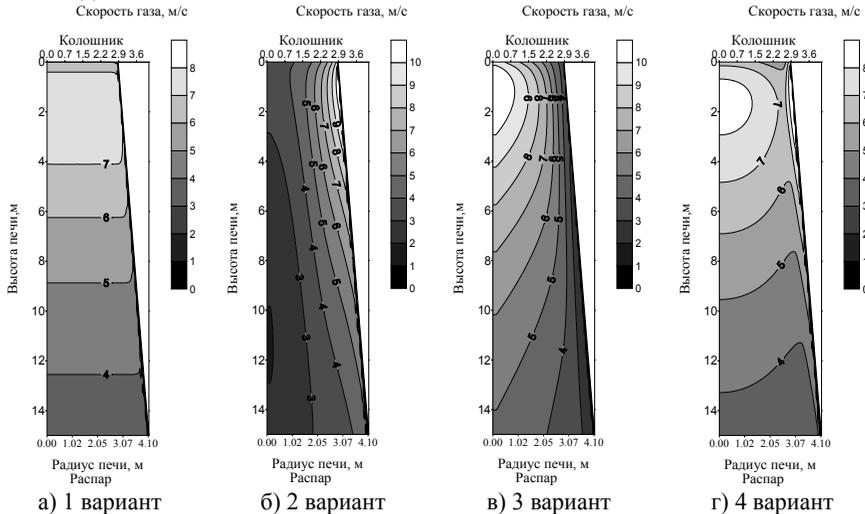


Рис. 5. Распределение осевой скорости газа (м/с) для различных вариантов распределения порозности шихты по радиусу

Тепловые потери являют важнейшим критерием, характеризующим работу доменной печи. Поэтому была проведена оценка тепловых потерь для четырех вариантов распределения материалов в печи (табл. 1).

Таблица 1. Тепловые потери для различных вариантов работы печи

Варианты распределения материалов	Суммарные тепловые потери, рассматриваемого участка, мВт	Удельные тепловые потери, кВт/м ²
порозность постоянна	1,29	5,73
периферийный ход	1,5	6,8
центральный ход	0,42	1,86
вариант наиболее приближенный к практике доменного производства	1,46	6,47

Качественная картина результатов 4-го варианта исследований, показанная на рис.6–7, довольно неплохо согласуется с экспериментальными данными проведенными Кинни [5] для печи №4 компании «Иллинойс К^о» объемом 710 м³ и полезной высотой 20,43 м (рис.8).

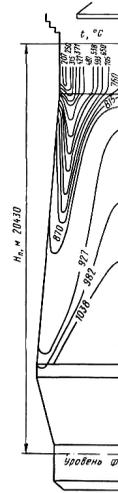
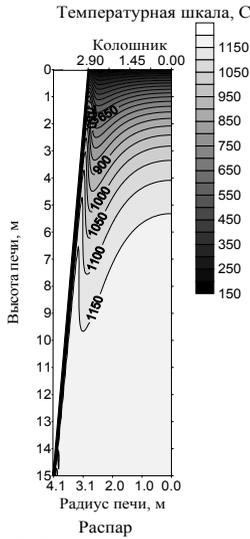
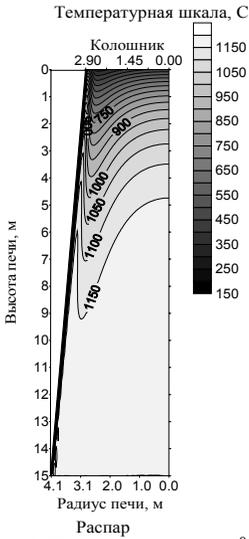


Рис. 6. Температура газа, °C

Рис. 7. Температура шихты, °C

Рис. 8. Изменение температуры газов в объеме шахты по исследованиям Кинни

Ряд исследований связанных с выходом из строя холодильников (рис.9), которые показали, что это приводит к повышению температуры футеровки ~ 100°С.

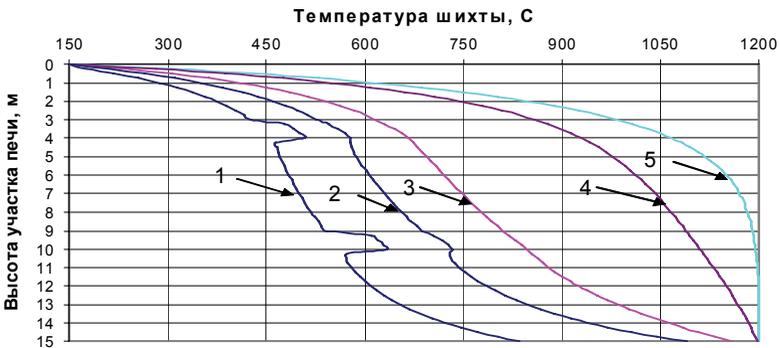


Рис.9. Распределение температуры шихты на различных расстояниях от стенки для 1-го варианта распределения материалов в печи по высоте печи при поврежденных холодильниках: 1 – 0 мм, 2 – 15 мм, 3 – 30 мм, 4 – 100 мм, 5 – ось

Также был проведен ряд исследований для случая, когда печь охлаждается не по всей высоте а, например, первые 4 метра от колошника не охлаждаемые. Эти результаты исследований позволили выявить такое явление

ние, как инверсия температур (рис.10), которое выявлялось на практике, но не получало должного обоснования. Явление инверсии объясняется резким переходом от неохлаждаемой области к охлаждаемой. В неохлаждаемой области температура футеровки выше, нежели в неохлаждаемой и этот фактор способствует образованию настыли, что и было выявлено на доменной печи №6 объемом 2000м³ «Миталл Стил Кривой Рог» (рис.11).

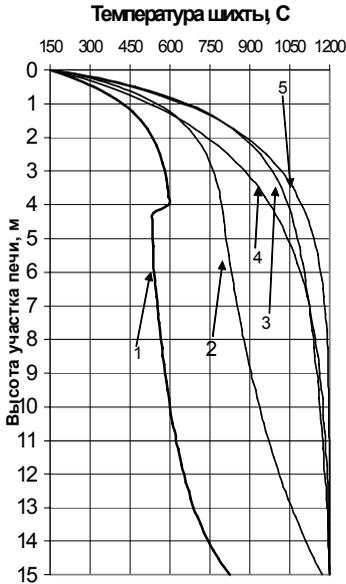


Рис.10. Температура шихты по высоте участка печи на различных расстояниях от стенки, мм. Для 4-го случая распределение материалов по радиусу печи: 1 — 0 мм, 2 — 30 мм, 3 — 100 мм, 4 — 270 мм, 5 — ось

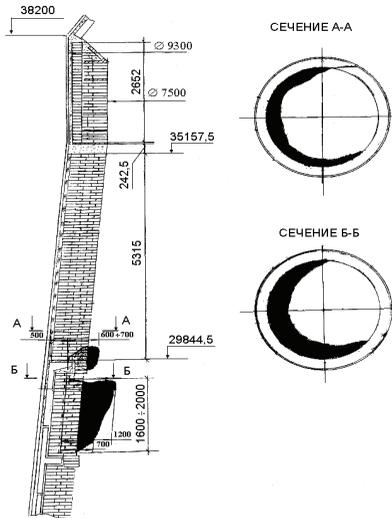


Рис.11. Настыль доменной печи №6 объемом 2000м³ «Миталл Стил Кривой Рог»

Выводы. Таким образом, результаты численного моделирования, проведенного методом конечных разностей, показали, что тепловые потери рабочего пространства печи не оказывают влияния на теплообмен в большей (центральной) части объема верхней зоны доменной печи. При этом, профили температур шихты по высоте на расстояниях от оси печи в пределах от 0 до 0,9 ее радиуса совпадают. Качественно иная картина наблюдается в периферийной области, где влияние принудительного охлаждения существенно. В результате охлаждения возле стенки образуется тепловой пограничный слой, в котором радиальные перепады температуры достигают 200⁰С и более. Толщина пограничного слоя (зоны влияния

охлаждения) невелика и составляет 200–300 мм, однако площадь периферийного пограничного слоя равна 10–15% от площади поперечного сечения печи. Отсюда следует, что в результате охлаждения значительная часть шихтовых материалов, движущихся на периферии, имеет пониженную температуру, и будет приходить на нижние горизонты печи недостаточно прогретой.

Полученные результаты полезны для совершенствования конструкции профиля и системы охлаждения печи, мониторинга состояния ограждения доменной печи, прогноза и управления тепло–газодинамическим режимом ее работы. Одной из причин образования настывлей, является инверсия температурного поля на стыке неохлаждаемой и охлаждаемой части шахты. Поэтому проектировать систему охлаждения, выбирать огнеупорные материалы необходимо так, чтобы свести до минимума возможность инверсии температурного поля на периферии печи. Авторы признательны д.т.н. А.В. Бородулину за внимание к данной работе.

1. *Домна в энергетическом измерении* / А.В. Бородулин, А.Д. Горбунов, В.И.Романенко и др.// СП «Мир» – Кривой Рог, 2004.– 412 с.
2. *Разработка мониторинга технического состояния ограждения доменной печи* / А.Л. Чайка, А.В. Бородулин, А.А. Сохацкий и др.// *Металлургическая тепло-техника: Сб. науч. тр.* – Днепропетровск.– НМетАУ.–2005. –Т.2. – С.383–392.
3. *Сохацький О., Бородулін О., Чайка О.* До розробки переносного моніторингу технічного стану шахти доменної печі.// *Вісник Академії митної служби України*, № 4(28), – Дніпропетровськ: В-во АМСУ, 2005. – С.97–104.
4. *Ergin S.* Chem. Eng. Progress. – 1952. –V.48. –P.89–94.
5. *Kinney S.P.* Движение шихты и газов в доменной печи // *Домез.*–1930.–№ 3(9). – С.51–106.

Статья рекомендована к печати докт.техн.наук В.В.Бородулиным