

**А.А.Сохацкий**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ В ПЕРИОДЕ ЕЕ ЗАДУВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАГРЕТОГО АЗОТА**

Проведены численные расчеты динамики изменения тепло–газодинамических и теплоэнергетических параметров работы доменной печи в период ее задувки. Расчеты проведены на примере доменной печи №9 объемом 5000м<sup>3</sup> ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» с использованием данных ее задувки 2003 г.

### **Современное состояние вопроса.**

Тепловые и газодинамические условия в рабочем пространстве доменной печи формируются в процессе ее задувки и раздувки. Эти условия определяют ровность хода, затраты сырья и топлива, техническое состояние и продолжительность кампании доменной печи.

Несмотря на большое количество существующих работ по тепломассообмену в доменных печах, процессы прогрева столба шихты и формирования в нем газового потока изучены недостаточно. Практический интерес представляет разработка методов прогноза и выбора рациональных условий тепловой работы доменной печи с учетом распределения в ней материалов, параметров горнового газа и охлаждения печи. Математическое моделирование теплообмена и газодинамики в противотоке газов и шихтовых материалов позволяет углубить знания о режимах работы доменной печи [1–3].

В период задувки доменной печи протекают сложные нестационарные процессы. Математических моделей, которые давали бы точное решение для нестационарных процессов на сегодняшний день не существует. В связи с этим для определения тепло–газодинамических параметров в период задувки доменной печи использовалась модифицированная система дифференциальных и интегральных уравнений (1)–(7) с граничными условиями (8)–(10) [3], которая реализована в виде комплекса программ под оболочкой Compaq Visual Fortran 6.6.

### **Реализация математической модели.**

В основу предложенной математической модели заложены фундаментальные законы газодинамики и теплообмена: уравнение движения (1), сохранения масс газа (2) и шихты (6), термического уравнения состояния газа (3), энергии газа (4) и шихты (5), уравнения теплового баланса для воды, циркулирующей по системе кольцевых холодильников (7). Математическая модель применима для исследования полей температур газа и шихты, а также полей скорости и давления газа во всем объеме печи с учетом работы ее системы охлаждения и конструкции ограждения.

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

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

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

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

$$\frac{\partial}{\partial z} [\rho_s \cdot u_s \cdot C_s \cdot T_s \cdot (1-\varepsilon) \cdot \Phi_w^2] = \quad (5)$$

$$\Phi_w^2 \cdot K_v \cdot (T_g - T_s) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[ (1-\varepsilon) \cdot \lambda_s \cdot r \cdot \frac{\partial T_s}{\partial r} \right];$$

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

$$\frac{\partial T_w}{\partial z} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_{bf} \cdot \Phi_w^2 \cdot (T_w - T_s|_{r=R_{bf}})}{M_w \cdot C_w \cdot \left[ \left( \frac{h}{\lambda} \right)_{gar} + \left( \frac{h}{\lambda} \right)_p + \left( \frac{h}{\lambda} \right)_{nm} + \left( \frac{h}{\lambda} \right)_c + \left( \frac{h}{\lambda} \right)_{zc} + \frac{1}{\alpha_w} \right]}, \quad (7)$$

где  $\mu_g$  – динамический коэффициент вязкости газа;  $d_s$  и  $\Phi_s$  – средний диаметр и коэффициент формы твердых частиц соответственно;  $M_g, M_s$  и  $M_w$  – массовые расходы газа, шихты и воды;  $R_g$  – газовая постоянная;  $C$  – теплоемкость;  $K_v$  – объемный коэффициент теплоотдачи между газом и шихтой;  $\lambda_s$  – коэффициент теплопроводности твердых частиц; коэффициент  $\Phi_w$  учитывает конусность профиля печи;  $\alpha_w$  – коэффициент теплоотдачи от стенок холодильника к воде;  $h_{gar}, h_p, h_{nm}, h_c, h_{zc}, \lambda_{gar}, \lambda_p, \lambda_{nm}, \lambda_c, \lambda_{zc}$  – толщина и коэффициент теплопроводности гарнисажа, футеровки, набивной массы, тела и трубки змеевика холодильника соответственно.

В общем виде граничные условия, приведенной системы уравнений (1–7), имеют следующий вид:

$$p|_{z=0} = p_0, \quad T_g|_{z=H} = T_{g,H}, \quad T_s|_{z=0} = T_{s,0}; \quad (8)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad -(1-\varepsilon)\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial r} \Big|_{r=R_{bf}} = q_w(z); \quad (9)$$

$$\frac{\partial u_g}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad u_g|_{r=R_{bf}} = 0, \\ T_w|_{z=z(i)} = (T_w)_i, \quad M_w|_{z=z(i)} = (M_w)_i, \quad i = 1, N_c, \quad (10)$$

Исследование влияния неравномерного распределения твердых материалов в печи и работы ее системы охлаждения на распределение температур шихты и газа в объеме сухой зоны рассматривалось с учетом данных задувки доменной печи № 9 объемом 5000 м<sup>3</sup> ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (рис.1–3) [4] и, для сравнения полученных результатов, с экспериментальными данными задувки доменной печи №2 в Огисиме объемом 4052 м<sup>3</sup> рис. 5–8 (д) [5].

В расчетах рассматривалось четыре базовых варианта распределения шихтовых материалов в печи (порозности) (рис. 4). Первый вариант соответствовал равномерному в радиальном направлении распределению порозности задувочной шихты доменной печи №9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог», который рассчитан по данным ее задувки в ноябре 2003 г., остальные варианты, второй, третий и четвертый, приняты на основании практики работы доменных печей с центральным и периферийным распределением газового потока и экспериментальных данных доменной печи №1 ОАО «Северсталь», взятых на оси, в рудном гребне и на периферии, в соответствии с программой загрузки шихтовых материалов.

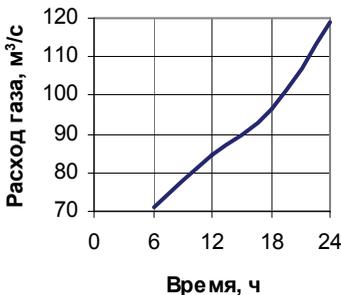


Рис.1. Изменение расхода колошниково-газового газа

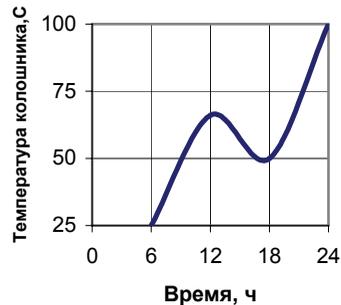


Рис.2. Изменение температуры колошниково-газового газа

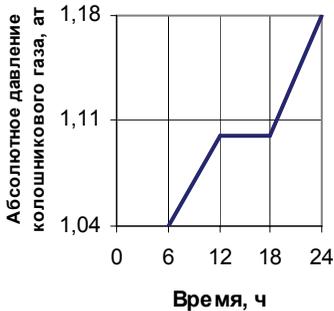


Рис. 3. Изменение давления колошниковых газов

Результаты расчета динамики прогрева столба шихты для первых трех выбранных вариантов распределения порозности представлены на рис.5–8 (а–в). Рисунок «а» соответствует равномерному распределению порозности по радиусу печи, «б–в» соответствует периферийному и центральному газораспределению. На рис.5–8 «г» показана взаимосвязь коэффициента использования топлива (КИТ) углерода кокса по зонам печи и температуры фурменной зоны от влияния содержания в дутье кислорода, а на рис. 5–8 «д» для сравнения показаны экспериментальные данные распределения газового потока и его температуры для печи объемом 4052 м<sup>3</sup> по данным японских исследователей [5].

Штрих-пунктирной линией и заштрихованной областью показаны зоны первичного шлакообразования, рис.5–8 (а–в), начало которой согласно литературным данным [6] выбрано от 1200<sup>0</sup>С.

Для всех вариантов расчета изолинии температур шихты возле стенки печи резко идут вниз рис.5–8 (а–в). Это явление обусловлено охлаждением стенки печи. Возле стенки печи образуется тепловой пограничный слой, толщиной около 300 мм, который обусловлен высоким градиентом температур, вызванный охлаждением печи. На одном и том же горизонте, температура на периферии печи намного ниже. Толщина теплового пограничного слоя и температура в нем зависит от режимов работы охлаждения, тепловой и газодинамической работы печи.

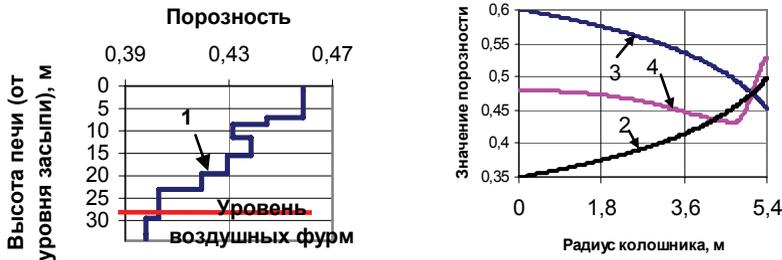
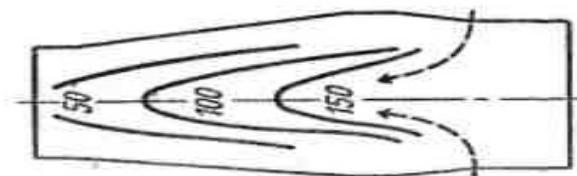
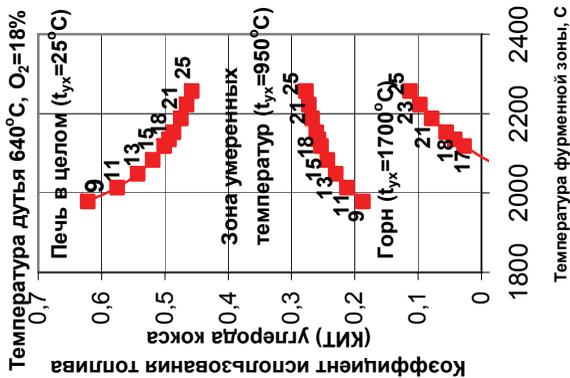
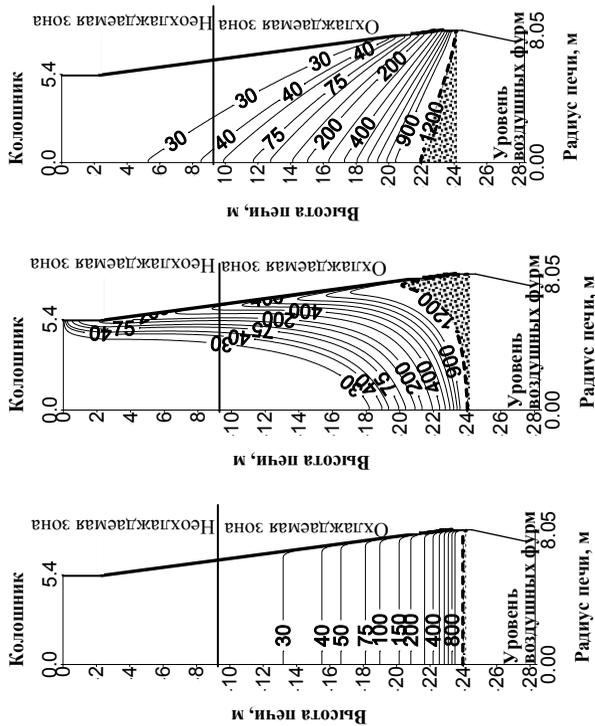
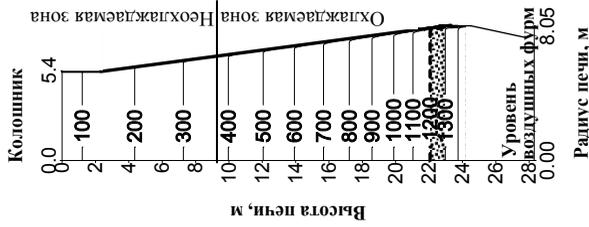


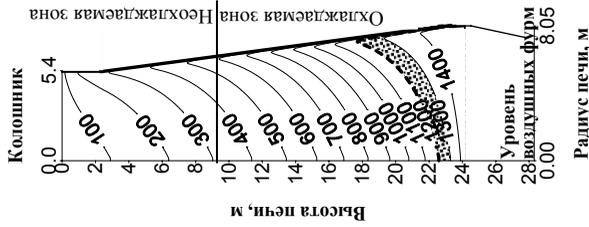
Рис. 4. Варианты распределения порозности при задувке: 1 – равномерное по радиусу; 2 – периферийное, 3 – центральное, 4 – экспериментальные данные с доменной печи №1 ОАО «Северсталь»



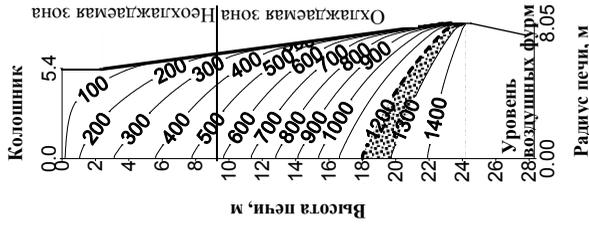
а б в г д  
 Рис. 5. Распределение температуры шихты в рассматриваемом объеме печи №9 по результатам расчета (а-в) и взаимосвязь КИТ углерода кокса по зонам печи и температуры фурменной зоны от влияния содержания в дугте кислорода (г) через 6 часов после начала задувки и экспериментальные данные распределение газового потока и его температуры для печи объемом 4052 м<sup>3</sup> [5] через 10 часов (д)



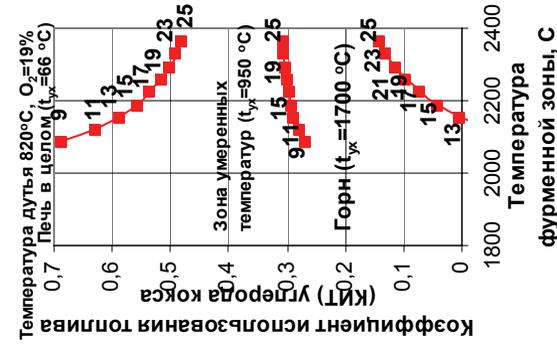
а



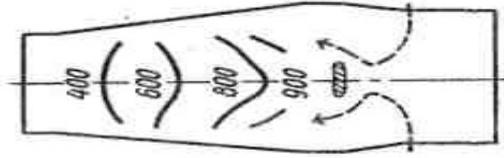
б



в

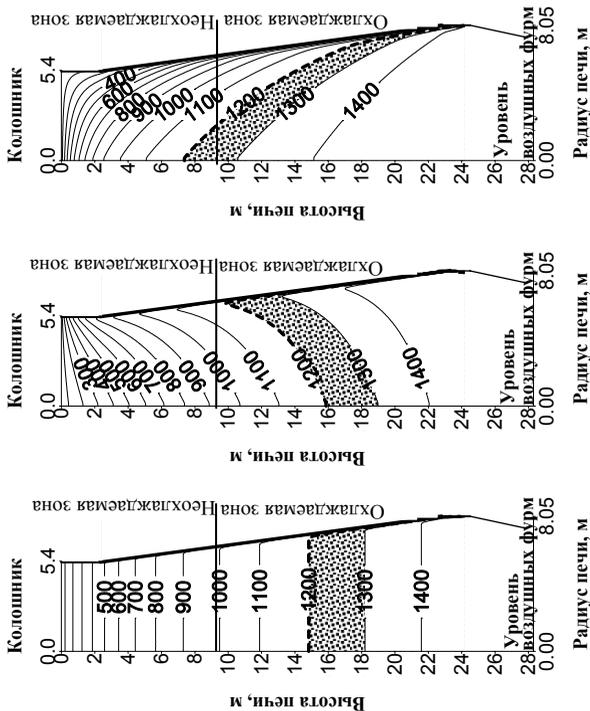


г



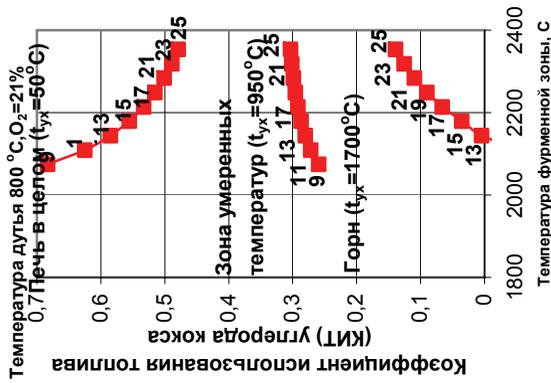
д

Рис. 6. Распределение температуры шихты в рассматриваемом объеме печи №9 по результатам расчета (а-в) и взаимосвязь КИТ углерода кокса по зонам печи и температуры фурменной зоны от влияния содержания в дутье кислорода (г) через 12 часов после начала задувки для различных вариантов распределения материалов и экспериментальные данные распределение газового потока и его температуры для печи объемом 4052 м<sup>3</sup> [5] (д)



а б г

д



Температура дутья 800 °С,  $O_2 = 21\%$ ,  
 0,7 Печь - в целом ( $t_{yx} = 50^\circ C$ )  
 Зона умеренных температур ( $t_{yx} = 950^\circ C$ )  
 Горн ( $t_{yx} = 1700^\circ C$ )

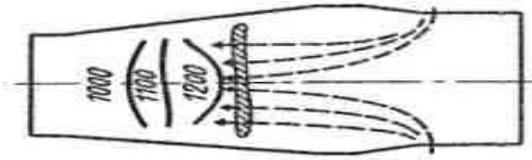
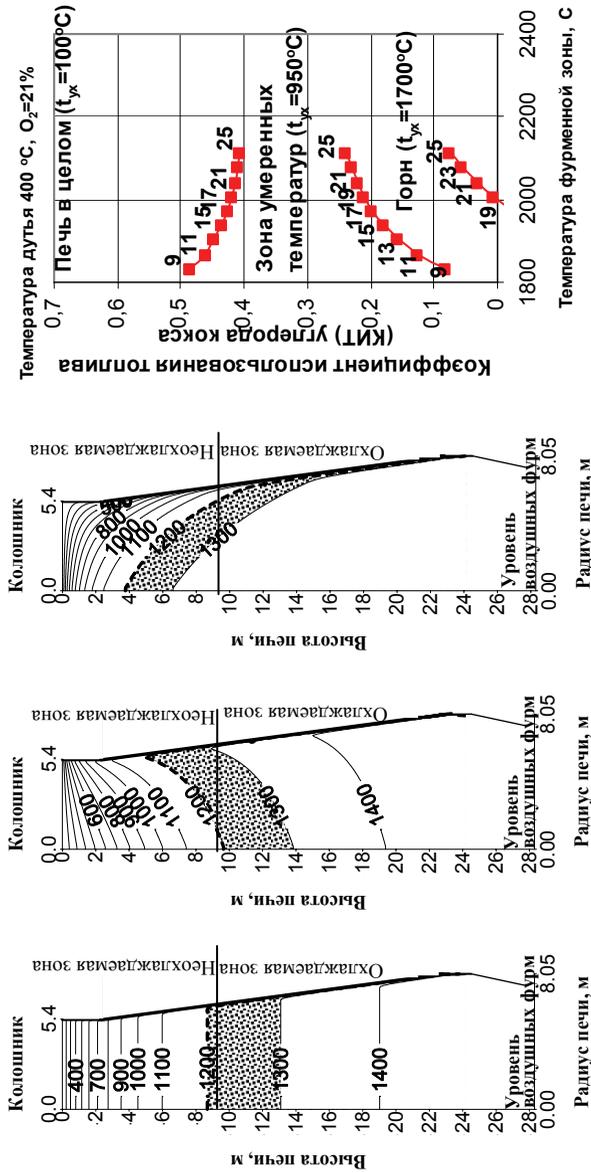


Рис. 7. Распределение температуры шихты в рассматриваемом объеме печи №9 по результатам расчета (а-в) и взаимосвязь КИТ углерода кокса по зонам печи и температуры фурменной зоны от влияния содержания в дутье кислорода (г) через 18 часов после начала задувки для различных вариантов распределения материалов и экспериментальные данные распределение газowego потока и его температуры для печи объемом 4052 м<sup>3</sup> [5] (д)



а

б

в

г

д

Рис. 8. Распределение температуры шихты в рассматриваемом объеме печи №9 по результатам расчета (а–в) и взаимосвязь КИТ углерода кокса по зонам печи и температуры фурменной зоны от влияния содержания в дутье кислорода (г) через 24 часов после начала задувки для различных вариантов распределения материалов и экспериментальные данные распределение газового потока и его температуры для печи объемом 4052 м<sup>3</sup> [5] (д) через 19–20 часов

Скорость прогрева шихтовых материалов для выбранных вариантов расчета определяется объемным коэффициентом теплоотдачи, порозностью столба шихты и количеством горнового газа проходящего через поперечное сечение печи (рис.1). При одних и тех же условиях в районах с наиболее высокой порозностью, скорость прогрева шихтовых материалов выше рис.5–8 (в) (вариант центрального газораспределения), а тепловые потери при этом ниже рис.9 (в). Результаты расчета показали, что минимальные тепловые нагрузки на футеровку доменной печи соответствуют центральному распределению газа, а максимальные периферийному рис.8.

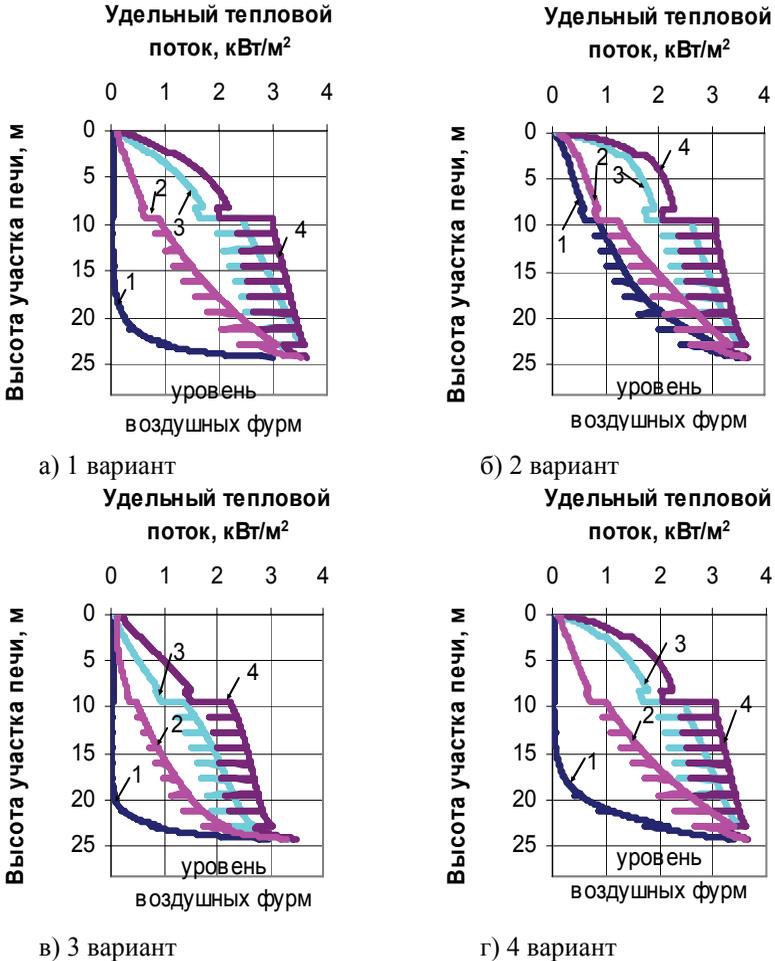


Рис. 9. Распределение удельных тепловых нагрузок на ограждение печи по ее высоте для 4-х вариантов распределения порозности в печи за различные интервалы времени: 1 – 6 часов; 2 – 12 часов; 3 – 18 часов; 4 – 24 часа

На адекватность разработанной модели реальным условиям указывает опыт задувки доменной печи №9 с центральным газораспределением в 2003 году и задувки доменной печи №5 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» с периферийным газораспределением в 2002 году. Тогда на печи №9 показания термопар установленных в кладку шахты не превышала 600<sup>0</sup>С, а на печи №5 превысили 1100<sup>0</sup>С через день после задувки (рис.8).

Тепловые потери являются важнейшей характеристикой, позволяющей контролировать и характеризовать работу доменной печи. Распределение величины удельного теплового потока к холодильнику по высоте доменной печи для 4–х вариантов распределения материалов приведено на рис.9 (а–г).

Для того, чтобы обеспечить согласованность прогрева столба шихтовых материалов с теплоэнергетическими показателями необходимо, параллельно с расчетом тепловых и газодинамических полей проводить ещё расчет и теплоэнергетических показателей доменной плавки.

Поэтому, дополнительно проведен расчет показателей доменной плавки печи №9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» в задувочном периоде в моменты времени 6, 12, 18 часов и 24 часа. Расчет выполнен по зонам печи, методом мгновенных тепловых балансов, с использованием усовершенствованной теплоэнергетической модели И.Д. Семикина [2], которая реализована в среде Excel и в виде комплекса программ под оболочкой Compaq Visual Fortran 6.6. Результаты расчета коэффициентов использования топлива (КИТов) углерода кокса и калориметрической температуры фурменной зоны приведены в таблице.

Таблица. Значения КИТ по зонам печи и температуры фурменной зоны в период задувки в фиксированные моменты времени

Время прошедшее с момента задувки	6 часов	12 часов	18 часов	24 часа
КИТ зоны расплава	0,0422	0,0944	0,1095	0,033
КИТ НСТ	0,2573	0,2998	0,2986	0,2221
КИТ печи	0,4932	0,516	0,5008	0,4139
Температура фурменной зоны, <sup>0</sup> С	2136	2261	2284	2044

Для вышеуказанных моментов времени 6, 12, 18 часов и 24 часа, сделан прогноз влияния содержания кислорода в дутье на КИТ углерода кокса по зонам печи и калориметрическую температуру фурменной зоны. Результаты прогноза показаны на рис.5–8 (г).

### **Выводы.**

Таким образом, разработан метод расчета совместного развития газодинамических и теплообменных процессов в сухой зоне доменной печи, который позволяет прогнозировать динамику прогрева шихтовых материалов в зависимости от их распределения в печи, с учетом параметров

колошникового газа, конструкции и организации работы системы охлаждения печи. Для согласования теплогазодинамической работы печи с теплоэнергетическими показателями параллельно проведен расчет теплоэнергетических показателей доменной плавки.

Установлено, что динамику прогрева столба шихтовых материалов определяет количество и параметры горновых газов проходящих через слой шихты. То есть при задувке доменных печей после загрузки в печь шихты определяющее значение для безопасной и устойчивой работы доменной печи имеет выбор параметров и состав дутья, организации тепловой работы ее фурменной зоны [7].

Результаты расчета показали, что наиболее щадящий футеровку и холодильники, тепловой режим работы доменной печи, соответствует центральному распределению газового потока. Практика показывает, что при этом обеспечивается не только безопасная работа ограждения печи, но и экономится кокс [8].

Автор благодарен за консультативную помощь д.т.н. Бородулину А.В.

1. *Моделирование* теплообмена и газодинамики в шахте доменной печи / А.Ф.Авцинов, А.В.Бородулин, В.К.Хрущ и др. // *Сталь*, 1996. – №8. – С. 4–9.
2. *Домна* в энергетическом измерении / А.В.Бородулин, А.Д.Горбунов, В.И.Романенко и др. // *Кривой Рог: СП «Мир»*, 2004. – 412 с.
3. *Математическое* моделирование и анализ процессов теплообмена и газодинамики в верхней зоне доменной печи с целью обеспечения надежной работы ограждения. / А.А.Сохацкий, И.А.Лукьяненко, Г.Т.Цыганков и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сборник научных трудов.* – Выпуск 14. – 2007. – С.50–59.
4. *Задувка* доменной печи объемом 5000 м<sup>3</sup> с применением нагретого азота / А.В.Бородулин, А.И.Васюченко, К.А.Дмитренко и др. // *Сталь*, 2006.– №9.– С.6–9.
5. *Кутнер С.М.* Технология задувки доменных печей за рубежом. (Обзорная информация // М.: Ин-т «Черметинформация», сер. «Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производство чугуна», вып. I. – 1984.– 43с.
6. *Титомиров Е.Н.* О формировании жидкой фазы в доменной печи // *Сталь*, 1996. – №11. – С.9–14.
7. *Исследования* режимов работы фурменной зоны доменной печи методами математического моделирования / А.Л.Чайка, А.Г.Байбуз, В.С.Листопадов и др. // *Международная научно-техническая конференция «Теория и практика производства чугуна», посвященная 70-летию КГГМК «Криворожсталь».* Кривой Рог, 2004 г.– С.328–332
8. *Задувка* доменной печи объемом 5000 м<sup>3</sup> с применением нагретого азота / А.В.Бородулин, А.И.Васюченко, К.А.Дмитренко и др. // *Сталь*. – 2006.– №9. – С.6–9.

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