

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА  
С ЦЕЛЬЮ РЕШЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ**

*Институт металлургии Уральского отделения РАН*

Рассмотрены математические модели агломерации и доменной плавки, разработанные в лаборатории пирометаллургии восстановительных процессов ИМет УрО РАН, и приведены примеры решения задач, имеющие теоретическое и практическое значение для доменного производства.

Комплекс математических моделей включает совместно работающие на основе единой базы данных модель агломерации, двумерные модели газодинамики, теплообмена, восстановления, зоны когезии, а также балансовые модели доменной плавки, позволяющие определить расход кокса, расход дутья, выход газа, температуру фурменного очага, используемые как входные параметры двумерных моделей [1–5].

*Математическая модель процесса агломерации.* Модель основана на учете нестационарного теплообмена в агломерационном слое, что позволяет повысить ее адекватность реальному процессу и ее прогнозные возможности. Использована единая база данных, используемая также для расчетов по балансовой и двумерным математическим моделям доменного процесса. Модель позволяет определить расходные коэффициенты компонентов шихты и природного газа, себестоимость и состав агломерата, выход и состав отходящего газа.

*Балансовая равновесная математическая модель.* Анализ работы многих доменных печей за длительный период позволил сделать предположение, что в определенной зоне печи на стадии восстановления магнетита реакция восстановления вюстита стремится к термодинамическому равновесию, которое связано с фактически реализуемым в доменной печи зональным режимом восстановления оксидов железа и реакциями регенерации оксида углерода и водорода (рис 1, точки С и С').

*Балансовая логико–статистическая модель.* Не имеющая аналогов, она включает в себя балансовую модель, наиболее значимые с точки зрения конечных результатов закономерности тепло– и массообмена, статистические данные. В качестве исходных данных в балансовой логико–статистической модели используются только независимые переменные, в том числе характеристики качества железорудных материалов; внутренние параметры работы печи, в частности, степень использования восстановительного потенциала горнового газа и температура колошникового газа являются результатами расчета. Выходным параметром, наряду с другими, является производительность печи, что принципиально важно.

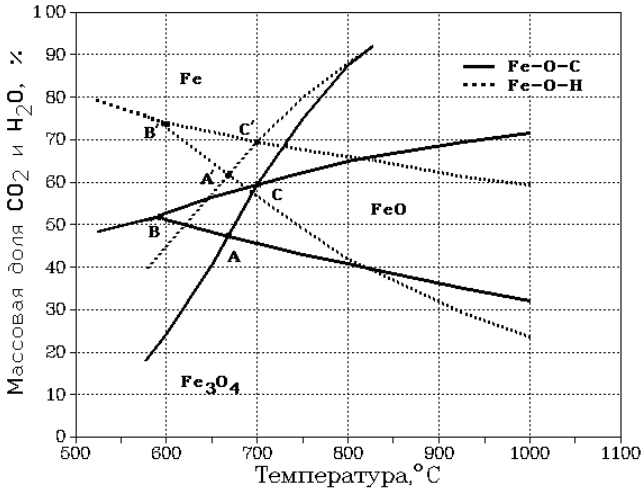


Рис. 1. Диаграмма равновесия

Эти балансовые математические модели могут использоваться как самостоятельно, так и в комплексе моделей.

Решение системы уравнений для нижней зоны, представленной условием термодинамического равновесия, а именно, константой равновесия реакции восстановления FeO оксидом углерода, а также материальным и тепловым балансами, дополненной уравнением теплового баланса для верхней зоны, позволяет рассчитать основные показатели доменной плавки. Определенные таким образом показатели являются предельно достижимыми (минимальными) при данных параметрах шихты и дутья. Применение фактических степеней использования газа вместо равновесных позволяет определить фактические показатели доменной плавки. Данная модель позволила разработать методику оценки эффективности работы доменной печи [6].

*Математическая модель газодинамики.* В основу математической модели газодинамики доменной плавки положена задача о фильтрации к одиночной дрене. Сделаны следующие допущения: движение газа стационарно и соответствует законам потенциального изотермического течения, порозность шихты постоянна во всем объеме, распределение потерь напора по высоте линейно, конвективные ускорения отсутствуют, газ несжимаем.

В случае двумерного движения газа вектор его скорости в каждой точке направлен по нормали к линиям равного напора  $\phi$  и по касательной к линиям равного расхода  $\psi$ . Поэтому распределение скоростей в плоскости, проходящей через ось фурмы и ось печи, будет описываться системой дифференциальных уравнений с частными производными

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial h^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} &= 0; \\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial h^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} &= 0; \end{aligned} \right\} (1)$$

с граничными условиями, отражающими фактическое давление газа на колошнике и фурмах доменной печи

$$\left. \begin{aligned} r = R_0, \quad \psi_0 &= \frac{\psi}{k_p(P_\phi - P_K)} = 0; \\ h = H_{II}, \quad \varphi_0 &= \frac{\varphi}{k_p(P_\phi - P_K)} = 0; \\ r = 0, \quad \psi_0 &= \frac{\psi}{k_p(P_\phi - P_K)} = V_\phi; \end{aligned} \right\} (2)$$

где  $r$  и  $R_0$  – текущий радиус и радиус печи, м;  $h$  и  $H_{II}$  – текущая высота и высота печи (расстояние от уровня засыпи до уровня фурм), м;  $P_\phi$  и  $P_K$  – давление газа на фурмах и колошнике, ати;  $V_\phi$  – расход газа через фурму, м<sup>3</sup>/мин;  $k_p$  – коэффициент газопроницаемости шихты, доли ед.

Решение задачи для шахты прямоугольного сечения осуществлено методом конформных отображений с помощью интеграла Кристоффеля–Шварца, являющегося обобщением эллиптического интеграла первого рода.

Ниже приведены формулы, полученные нами впервые, позволяющие проводить расчеты в комплексной области.

Скорость газа в каждой точке в общем случае является функцией координаты  $Z$  ( $\bar{Z} = Y + i \cdot X$ ;  $Y$  и  $X$ , соответственно, ордината и абсцисса) этой точки, которая определяется по следующей зависимости

$$\bar{Z} = \frac{H_{II}}{K_I} F(\bar{\tau}, k_I), (3)$$

где  $K_I$  – полный эллиптический интеграл первого рода с модулем  $k_I$ ;  $F$  – эллиптический интеграл первого рода с аргументом  $\tau$  и модулем  $k_I$ .

Для расчета эллиптического интеграла первого рода  $F(\bar{\tau}, k_I)$  в комплексной области использовали метод Ю.С. Сикорского.

Для расчета величины  $\bar{\tau}$  в зависимости от комплексного потенциала  $\omega$  получено следующее выражение

$$\bar{z} = \sqrt{\frac{1 - \sin^2\left(\frac{\pi \cdot \bar{\omega}}{2i}\right) \cdot k_2 \cdot \operatorname{sn}^2\left(\frac{K_2}{R_0} L_\phi, k_2\right)}{k_1^2 + \sin^2\left(\frac{\pi \cdot \bar{\omega}}{2i}\right) \cdot k_2^2 \cdot \left[1 - \operatorname{sn}^2\left(\frac{K_2}{R_0} L_\phi, k_2\right)\right]}}. \quad (4)$$

Здесь  $K_2$  – полный эллиптический интеграл первого рода с модулем  $k_2$ ;  $\operatorname{sn}$  – эллиптический синус;  $\bar{\omega}$  – комплексный потенциал.

Комплексный потенциал  $\bar{\omega}$  записывается в виде

$$\bar{\omega} = \varphi + i\psi. \quad (5)$$

Здесь  $\psi$  – функция тока (определяет линии равных расходов);  $\varphi$  – потенциал поля скоростей (определяет линии равных напоров).

Для расчета координат линий тока  $Z$  и значений скоростей газа  $V$  в точке с данной координатой (поля скоростей) необходимо последовательно изменять значения  $\varphi$  и  $\psi$  с шагом, обеспечивающим получение газодинамической сетки необходимой частоты. Скорость газа в данной точке определяется по зависимости

$$\vec{V}_r = \frac{2k_p \cdot V_{ГСП} \cdot K_2 \sqrt{1 - \delta^2 k_2^2} \cdot \operatorname{sn}\left(\frac{K_1}{H_{II}} \bar{Z}, k_1\right)}{\pi \cdot [\delta^2 + (1 - \delta^2)] \cdot \operatorname{sn}^2\left(\frac{K_1}{H_{II}} \bar{Z}, k_1\right)}, \quad \delta = \operatorname{sn}\left(\frac{K_2}{R_0} L_\phi, k_2\right). \quad (6)$$

Здесь  $V_{ГСП}$  – средняя по горизонтальному сечению шахты скорость движения газа, м/с;  $k_p$  – коэффициент, учитывающий нелинейное изменение перепада давления по высоте доменной печи.

Результатами расчета являются выводимые на экран дисплея изображения газодинамической сетки движения, которая является неравномерной, и поле скоростей газа, т.е. значения скоростей в узлах сетки, на основании которой строятся линии равных скоростей, если точки соединить линиями.

*Математическая модель теплообмена.* В основу математической модели теплообмена доменной плавки положено предложенное нами аналитическое решение задачи о нагреве слоя при переменных, зависящих от координаты (скорости газа), теплоемкостях потоков шихты  $W_{ш}$  и газа  $W_r$ , коэффициенте теплоотдачи  $\alpha_{\Sigma V}$ .

Для линий тока, находящихся в вертикальной плоскости, проходящей через оси фурмы и печи, справедливы дифференциальные уравнения теплообмена в противотоке

$$\left. \begin{aligned} W_{ш}(h) \cdot dt_{ш} &= \alpha_{\Sigma V}(h) \cdot S(h) \cdot [t_r(h) - t_{ш}(h)] dh \\ W_r(h) \cdot dt_r &= \alpha_{\Sigma V}(h) \cdot S(h) \cdot [t_r(h) - t_{ш}(h)] dh \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

где  $S(h)$  – сечение трубки тока.

В связи с тем, что в настоящее время практически невозможно разработать математическую модель движения шихты даже с большими допущениями, на основании сопоставления сетки движения газа и линий равных скоростей газа с траекториями опускания частиц шихты и линиями равных скоростей движения шихты, принято допущение о подобии полей скоростей шихты и газа.

На этом основании в первом уравнении системы (7)  $W_{III}(h)$  заменено на  $W_{\Gamma}(h) \cdot m(h)$

$$\left. \begin{aligned} W_{\Gamma}(h) \cdot m(h) \cdot dt_{III} &= \alpha_{\Sigma V}(h) \cdot S(h) \cdot [t_{\Gamma}(h) - t_{III}(h)] dh \\ W_{\Gamma}(h) \cdot dt_{\Gamma} &= \alpha_{\Sigma V}(h) \cdot S(h) \cdot [t_{\Gamma}(h) - t_{III}(h)] dh \end{aligned} \right\} \cdot (8)$$

где  $W_{\Gamma}$  – теплоемкость потока газа, Вт/°С;  $m$  – отношение теплоемкостей потоков шихты и газа, доли ед.;  $\alpha_{\Sigma V}$  – суммарный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>3</sup>·град);  $S$  – сечение трубки тока, м<sup>2</sup>;  $t_{\Gamma}$  и  $t_{III}$  – температуры газа и шихты, °С;  $h$  – расстояние от уровня засыпи до точки, в которой рассчитывается температура, вдоль линии тока, м.

Граничные условия, отражающие завершенность теплообмена и деление рабочего пространства печи на две зоны, имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} h &= H, \quad t_{\Gamma} = t'_{\Gamma}, \\ m(h) &= 1, \quad \frac{dt_{III}}{dh} = \frac{dt_{\Gamma}}{dh} \end{aligned} \right\} \cdot (9)$$

Здесь  $H$  – длина линии тока, м;  $t'_{\Gamma}$  – температура газа на входе в слой (температура фурменного очага), °С.

формулы для расчета температур шихты  $t_{III}$  и газа  $t_{\Gamma}$  вдоль линий тока ( $h$  отсчитывается по пути движения шихты, т.е. сверху вниз) имеют вид

$$\left. \begin{aligned} t_{\Gamma}(h) &= B + A \int_0^h \frac{\alpha_{\Sigma V}(h) \cdot S(h)}{W_{\Gamma}(h)} e^{-f(h)} dh, \quad ^{\circ}C \\ t_{III}(h) &= t'_{III} + A \int_0^h \frac{\alpha_{\Sigma V}(h) \cdot S(h)}{m(h) \cdot W_{\Gamma}(h)} e^{-f(h)} dh, \quad ^{\circ}C \end{aligned} \right\} \cdot (10)$$

Здесь

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{t'_{\Gamma} - t'_{III}}{e^{-f(H)} + \int_0^H \frac{\alpha_{\Sigma V}(h) \cdot S(h)}{m(h) \cdot W_{\Gamma}(h)} \cdot e^{-f(h)} \cdot dh} \\ B &= t'_{III} + A \\ f(h) &= \int_0^h \frac{\alpha_{\Sigma V}(h) \cdot S(h)}{m(h) \cdot W_{\Gamma}(h)} \cdot [1 - m(h)] \cdot dh \end{aligned} \right\} \cdot (11)$$

При постоянных значениях  $W_{\Gamma}$ ,  $m$  и  $\alpha_{sv}$  найденные зависимости преобразуются в известные формулы Б.И. Китаева для расчета теплообмена в противотоке, причем уравнения (10)–(11) объединяют все три возможных случая в зависимости от соотношения  $W_{ш}$  и  $W_{\Gamma}$ .

В результате расчетов по уравнениям (10)–(11) определяются изотермы шихты и газа, а также распределения температур шихты и газа в любом горизонтальном или вертикальном сечении, используемые при адаптации модели и для анализа явлений. Ход изотерм характеризует неравномерность распределения по радиусу печи процессов теплообмена, а, следовательно, и процессов восстановления. Характер изотерм газа определенно выражает существование двух основных источников неравномерности в доменной печи: фурменный подвод дутья и системы загрузки (как правило, конусные).

*Математическая модель восстановления.* Выполнено численное решение системы дифференциальных уравнений массообмена и восстановления при введении в нее в явном виде модуля скорости газа, получаемого из математической модели газодинамики, а также с учетом зависимости суммарного коэффициента массообмена, как от температуры, так и от степени восстановления.

В основу математической модели восстановления оксидов железа положена система дифференциальных уравнений массообмена и восстановления

$$\left. \begin{aligned} v_{\Gamma}(h) \cdot dC &= -K_{\Sigma V 0} \cdot e^{-(E/RT)} \cdot (1 - \varphi_{Fe}) \cdot C \cdot dh; \\ m^*(h) \cdot \frac{d\varphi_{Fe}}{dh} &= \frac{dC}{dh}; \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

где  $C$  – относительный концентрационный потенциал газового потока (или относительный потенциал массообмена), доли ед.;  $\varphi_{Fe}$  – степень восстановления оксидов железа, доли ед.;  $m^*$  – отношение массемкостей потоков шихты и газа, доли ед.;  $K_{\Sigma V 0}$  – суммарный коэффициент массообмена при  $\varphi_{Fe} = 0$ , см/с;  $E$  – энергия активации, Дж/моль;  $R$  – газовая постоянная, Дж/моль·К.

Концентрационный потенциал  $C$  использован Б.И. Китаевым для анализа процессов восстановления в доменной печи.

Начальные условия

$$\left. \begin{aligned} h = 0, \quad \varphi_{Fe} &= \varphi_{Fe_0} \\ h = 0, \quad C &= C_0 \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

Здесь  $\varphi_{Fe_0}$  и  $C_0$  – значения  $\varphi_0$  и  $C$  на уровне засыпи, %.

Особенностью системы уравнений является введение в нее в явном виде модуля скорости газа  $v_{\Gamma}$ , получаемой из математической модели газодинамики, а также зависимость суммарного коэффициента массообмена  $K_{\Sigma V 0}$  как от температуры, так и от степени восстановления.

Эта система уравнений решена численным методом, с предварительным проведением интерполирования входящих в систему переменных. Для этого применен метод сплайн-функций – интерполяция обобщенными кубическими сплайнами, а именно, рациональным сплайном, позволяющим интерполировать функции с большими градиентами.

Результатами расчета являются поля степеней восстановления железа и концентрационных потенциалов газа, анализ которых показывает, что восстановительные процессы распределены по радиусу печи неравномерно, что вызвано, в свою очередь, неравномерным распределением по радиусу печи восстановительного потенциала газа.

*Математическая модель зоны когезии.* Использование разработанных математических моделей газодинамики, теплообмена и восстановления с их особенностями приводит к тому, что расчетная форма зоны когезии, ее толщина и положение по высоте доменной печи определяются:

- характером неравномерности температурного поля, зависящего от системы загрузки, положения фурменного очага, профиля шахты и изменения газодинамического сопротивления по высоте доменной печи;
- температурами размягчения и плавления железорудного материала, зависящими от степени восстановления.

Балансовая логико-статистическая модель разработана на языке Си с использованием компилятора Borland C++.

Программа балансовой равновесной модели написана на языке Basic. Для компиляции программы использован транслятор Visual Basic 6.0, работающий в среде Microsoft Visual Studio 6 и создающий 32-разрядные приложения для операционной системы Windows.

Программа двумерной модели написана на языке Fortran. Для компиляции программы использован компилятор Compaq Visual Fortran v.6.6B, работающий в среде Developer Studio. Этот компилятор создает 32-разрядные приложения и работает под Windows. Этот компилятор имеет большие графические возможности.

Единая база данных для комплекса математических моделей (балансовых и двумерных) разработана с использованием пакета программ для обработки данных Code-base в формате файлов системы FoxPro (\*.dbf и \*.cdx). Разработанная база данных позволяет хранить до 200 наименований каждого из ее элементов (железорудные и флюсоующие материалы, добавки, горючие, профили печей, параметры плавки и т.п.). При этом ограничение носит субъективный характер, исходящий из принципа разумной достаточности, и при необходимости возможно перепрограммирование на больший объем хранимой информации. Для формирования и редактирования файлов исходных данных применен высокоуровневый программный интерфейс C-scrape. Развитая система экранов и интерактивных меню, генерируемых его системой Look&Feel, позволяют эффективно оперировать исходной информацией в удобном для пользователя виде.

Объединение безразмерных балансовых и двумерных математических моделей в единый комплекс выполнено средствами BuilderC++3.0 путем разработки программного обеспечения для автоматической без выхода из среды Windows передачи данных через создание таблиц формата dBASE.IV (\*.dbf <256 полей) и преобразования их в формат, воспринимаемый Compaq Visual Fortran v.6.6B.

Главным вопросом при решении задачи объединения является взаимоувязка разномерных моделей – безразмерной (в смысле количества пространственных координат) балансовой модели и двумерных моделей газодинамики, теплообмена, восстановления и др. При решении этого вопроса используется следующая информация – коэффициент неравномерности распределения газового потока  $\mu_r$  и диаграммы распределения диоксида углерода и температуры газа по радиусу печи.

Результатами расчетов с использованием комплекса моделей являются основные технико-экономические показатели доменной плавки (расход кокса, производительность, температура и состав колошникового газа, химический состав чугуна и шлака) и двумерные распределения основных параметров процесса (температуры шихты и газа, скорость газа, степень прямого восстановления, восстановительный потенциал газа, положение зоны когезии).

На основе этого комплекса математических моделей разработан новый метод аналитического исследования доменного процесса, предусматривающий двумерный контроль и прогноз газодинамических и температурных полей в любом вертикальном сечении печи при изменении параметров дутья и систем загрузки, состава шихты и качества железорудного сырья, элементов конструкции (высов и диаметр фурм, объем и профиль печи).

Решен ряд задач (в камеральном варианте), имеющих как теоретическое, так и практическое значение.

- проанализировано изменение процессов газодинамики и теплообмена в объеме доменной печи при использовании новых технических решений – применении комбинированного дутья с высокими расходами природного газа и кислорода, вдувании угольной пыли, изменении профиля печи;

- исследовано изменение характера температурных и скоростных полей при отклонениях от нормального хода доменного процесса – нарушении теплообмена, окружной неравномерности, тихом ходе, нарушении графика выпусков; решены также и другие задачи (рис. 2–5).

Совместными усилиями специалистов Института чёрной металлургии, заводов им. Г. И. Петровского и им. Ф. Э. Дзержинского впервые в мировой практике освоена технология интенсификации работы доменных печей за счет вдувания природного газа в сочетании с обогащением дутья кислородом. Разработке присуждена Ленинская премия. Звания лауреатов



удостоены академик АН УССР З.И. Некрасов и докт. техн. наук Н.И. Кравцев.

Известно, что в опытных плавках при содержании кислорода в дутье 35 и 40 % возникли трудности, связанные с похолоданием шахты. Проанализированы причины возникновения, а также пути ликвидации этих трудностей. Температурные поля шихты и газа при содержании кислорода в дутье 35 и 50 % приведены на рис. 3. Видно, что при увеличении содержания кислорода в дутье холодает не только колошник, но и шахта на всем протяжении, вплоть до уровня фурм, во всех вертикальных сечениях. Причем в области рудного гребня возникает кризисное явление – отношение теплоемкостей потоков шихты и газа на колошнике приближается к единице и происходит вырождение верхней ступени теплообмена уже при содержании кислорода в дутье 45 %. Это вызывает необходимость выравнивания рудной нагрузки по радиусу при содержании кислорода в дутье более 40 %.

Подвод дутья к фурмам через кольцевой воздухопровод приводит к неравномерному распределению дутья и, следовательно, газа по окружности, на которое накладывается неравномерное распределение шихты загрузочными устройствами. С помощью двумерной математической модели проанализирован характер полей скоростей газа и температурных полей шихты и газа для вертикальных плоскостей, проходящих через оси воздушных фурм с различными расходами дутья, при постоянном распределении рудной нагрузки по радиусу для доменной печи объемом 1513 м<sup>3</sup>. Рассчитаны поля скоростей газа (рис.5) и температурные поля шихты (рис.6) и газа (двумерные температурные поля приведены на рис.7, а трехмерные – на рис.8) для вертикальных плоскостей, проходящих через оси воздушных фурм: со средним по окружности расходом дутья (б, г) и отличающимся от него на 10 % в большую (а) и меньшую стороны (в) при постоянном распределении рудной нагрузки по радиусу для доменной печи объемом 1513 м<sup>3</sup>. Из рис. 5 видно, что снижение расхода дутья через фурму приводит к смещению максимума скоростей газа к стенке печи и уменьшению общего уровня скоростей газа в данном вертикальном сечении, что вызывает увеличение отношения теплоемкостей потоков шихты и газа и, следовательно, к снижению температур шихты и газа по всей высоте данного сечения (рис. 7–8). В области рудного гребня отношение теплоемкостей потоков шихты и газа может приближаться к единице при снижении расхода дутья через фурму лишь на 10 % от среднего, и эта область становится критической по теплообмену. Это вызывает необходимость контроля окружной неравномерности, что целесообразно делать с помощью двумерной математической модели и показаний термопар, установленных на периферии ниже уровня засыпи в 8–и точках по окружности печи. Информация, полученная от этих термопар, может использоваться в качестве реперных точек при расчетах по математической модели температурных полей, в том числе и трехмерных, получаемых путем по-

следовательного по ворота расчетной плоскости относительно оси печи на угол  $360^\circ$ /количество фурм (рис.8).

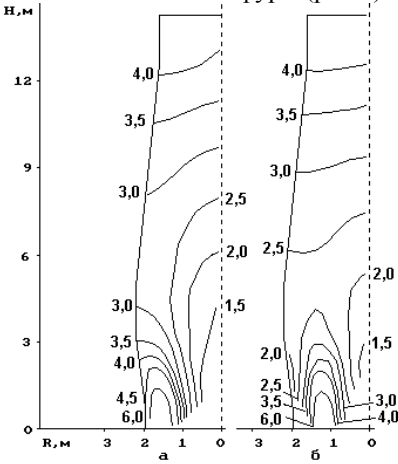


Рис. 2. Поля скоростей газа при различных положениях фурменного очага:  $L_\phi = 0,3$  м (а) и  $L_\phi = 0,7$  м (б). Цифры у кривых – скорости, м/с

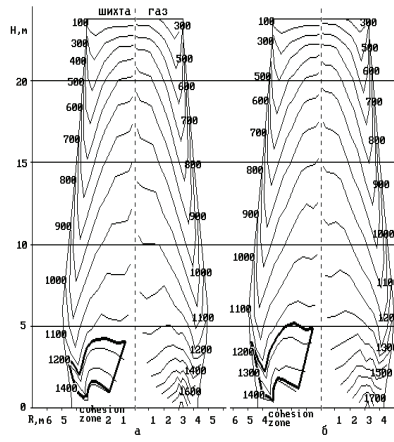


Рис. 3. Температурные поля шихты и газа без вдувания (а) и с вдуванием (б) угольной пыли

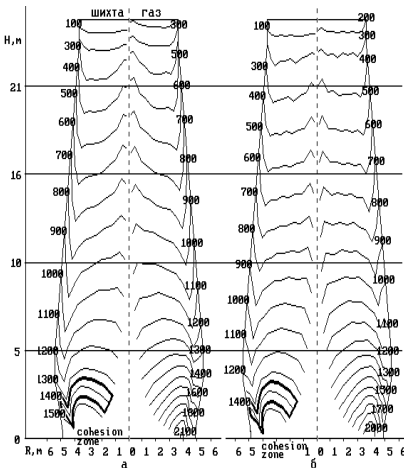


Рис. 4. Температурные поля шихты и газа при содержании кислорода в дутье 35% (а) и 50% (б)

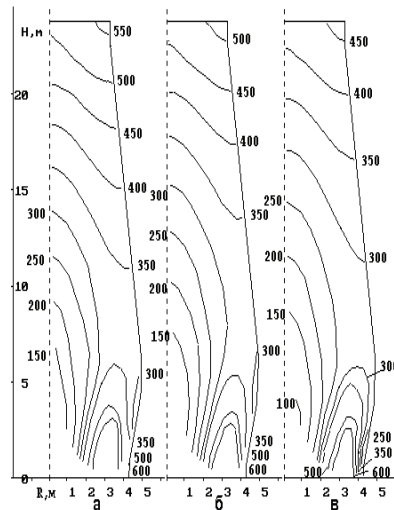


Рис. 5. Поля скоростей газа (см/с)

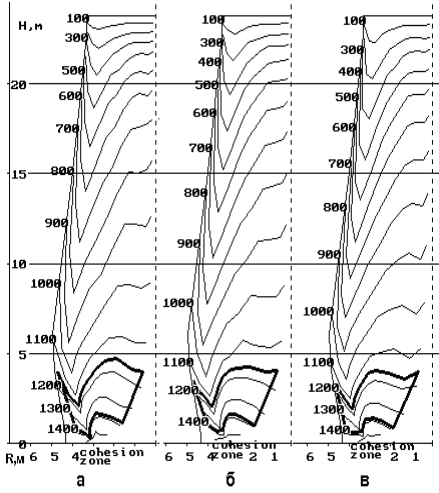


Рис. 6. Температурные поля шихты

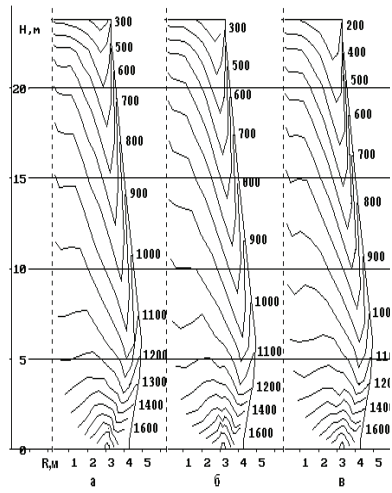


Рис. 7. Температурные поля газа

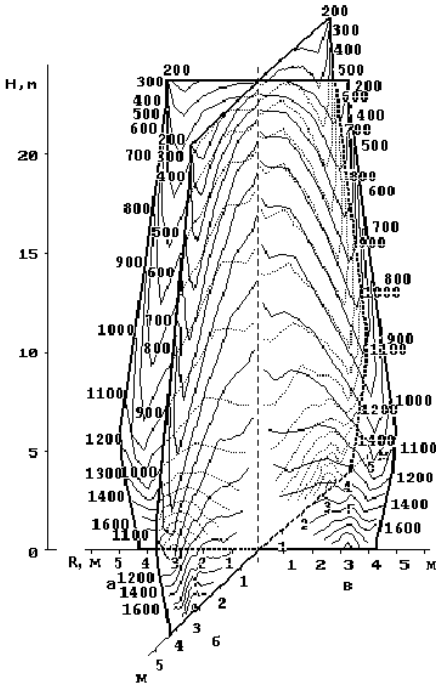


Рис. 8. Трехмерное температурное поле газа

Известно, что выравнивание неравномерности по окружности можно за счет оптимизации распределения шихты [7]. Кроме того, особенно при возникновении кризисного явления в одном из вертикальных сечений, возможно, на наш взгляд, следующее воздействие закрытие на противоположной стороне воздушной фурмы, что позволит увеличить в кризисном сечении расход газа, его скорость, и, следовательно, температуру. Следовательно, использование двумерной математической модели и показаний периферийных термопар позволяет анализировать не только радиальную, но и окружную неравномерность, создаваемые фурменным подводом дутья и загрузочным устройством доменной печи.

Таким образом, решение уравнений теплообмена, массообмена и восстановления в условиях двумерного поля скоростей позволяет расширить области аналитического исследования и решения практических задач доменного процесса.

1. *Основы теории и технологии доменной плавки* / А.Н.Дмитриев, Н.С.Шумаков, Л.И.Леонтьев, О.П.Онорин. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 547 с.
2. *Развитие трехуровневых АСУ ТП в металлургии (коксовые и бескоксовые процессы)* / В.Г.Лисиенко, Е.Л.Суханов, В.А.Морозова и др. Учебное пособие. – М.: Теплотехник, 2006. – 328 с.
3. *Дмитриев А.Н.* Развитие и применение теории газодинамики, тепло– и массообмена для решения практических задач доменного производства на основе комплекса математических моделей / Познание процессов доменной плавки (Коллективный труд). – Днепропетровск: Пороги. 2006. – С. 207–226.
4. *Ченцов А.В., Чесноков Ю.А., Шаврин С.В.* Балансовая логико–статистическая модель доменного процесса. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 164 с.
5. *Дмитриев А.Н.* Математическое моделирование двумерных процессов в доменной печи / Вычислительные методы и программирование. – 2004. – Т.5. – Раздел 1. – С.252–267 (<http://www.srcc.msu.su/num-meth>).
6. *Дмитриев А.Н.* Анализ эффективности работы доменных печей. – Энергоанализ и энергоэффективность, 2004. – № 4–5. – С.41–42.
7. *Тарасов В.П.* Газодинамика доменного процесса. – М.: Металлургия, 1990. – 216 с.

*Сведения об авторе:*

**Дмитриев Андрей Николаевич**, д.т.н., профессор, действительный член РАЕН, член-корр. АИИРФ, зав. лабораторией Института металлургии УрО РАН (ИМет УрО РН), Россия, г. Екатеринбург