

## РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ИНЖЕКЦИИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ФУРМЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

*Швыдкий В.С., д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика  
в металлургии» (vladimirsvydkiy@gmail.com)*

*Куделин С.П., к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика  
в металлургии» (s.p.kudelin@urfu.ru)*

*Гурин И.А., ассистент кафедры «Теплофизика и информатика  
в металлургии» (ivan.gurin@urfu.ru)*

*Носков В.Ю., старший преподаватель кафедры «Теплофизика и информатика  
в металлургии» (vynoskov@gmail.com)*

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 28)

**Аннотация.** Рассмотрена математическая модель фурменного очага доменной печи при инжекции пылеугольного топлива. При математическом моделировании фурменного очага выделено две подсистемы: 1) нагрев частиц угольной пыли и выделение летучих в фурменном очаге; 2) теплообмен и процесс горения в фурменном приборе. Исследовано двумерное поле скоростей газа в фурменном очаге. Процессы горения рассмотрены как совокупность параллельно развивающихся явлений горения кокса в слое, одиночных кусков кокса и частиц угольной пыли. Модель включает уравнения баланса общей массы газа, баланса массы компонентов газа, теплового баланса газа, движения частиц угольной пыли, теплового баланса частицы угольной пыли. В ней рассчитываются максимальная температура горения в фурменном очаге, расстояние от среза фурмы до фокуса горения, протяженность кислородной зоны горения, температура газа, содержание компонентов газовой фазы и степень выгорания углерода пылеугольного топлива на выходе из фурменного очага. Разработана информационно-моделирующая система. Последняя позволяет исследовать влияние характеристик комбинированного дутья, свойств кокса и угольной пыли, геометрических размеров фурм и других факторов на поля температур и концентраций компонентов газовой фазы в фурменном очаге. Рассматриваемая система позволяет подобрать рациональный режим инжекции пылеугольного топлива, который обеспечит полноту его сгорания в границах фурменных очагов. Основными функциями программного обеспечения является представление результатов расчета в виде таблиц и графиков, хранение вариантов исходных данных в базе данных, экспорт результатов расчета во внешний файл формата Microsoft Excel. Сделаны выводы о снижении температуры горения в фурменном очаге, приближении фокуса горения к фурме при вдувании пылеугольного топлива, о необходимости использования углей с определенными качественными характеристиками и месте ввода угольной пыли в поток дутья.

**Ключевые слова:** доменная печь, пылеугольное топливо, инжекция, горение, моделирование, фурменный очаг, программное обеспечение.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-12-979-986

### ВВЕДЕНИЕ

Для современного коксохимического производства характерно сокращение запасов коксующихся углей. Это, с одной стороны, затрудняет получение прочного и малосернистого кокса, а с другой стороны, вызывает повышение его стоимости. Доля стоимости кокса в стоимости шихты составляет около 40 – 60 % при удельном расходе 360 – 450 кг/т чугуна, поэтому для снижения себестоимости чугуна необходимо уменьшение его удельного расхода, что может быть достигнуто за счет использования других видов топлива при ведении доменной плавки. Перспективной является технология вдувания пылеугольного топлива (ПУТ) в фурменные очаги доменных печей. Она получила широкое практическое

применение на металлургических комбинатах Японии, России, Украины и других стран, начиная с 80-х годов. Преимуществом использования этой технологии являются большие запасы и значительно меньшая стоимость неспекающихся марок углей, чем стоимость кокса, а также высокая теплота сгорания у фурм доменной печи [1]. На сегодняшний день удельный расход пылеугольного топлива на лучших доменных печах составляет до 180 – 250 кг/т чугуна, а в теории до 40 % кокса может быть заменено угольной пылью [2].

Применение ПУТ снижает затраты на топливо в доменном процессе на 35 – 50 % за счет уменьшения удельного расхода кокса. Кроме этого, стоимость строительства комплекса по производству пылеугольного топлива значительно ниже, чем строительство

коксохимического предприятия аналогичной мощности, а затраты на реконструкцию коксовых батарей в 1,5 раза превышают стоимость ремонт комплекса. Также производство кокса влечет за собой выброс в атмосферу значительного количества пыли и вредных газов. Вредные выбросы при производстве кокса в десять раз превышают выбросы при подготовке эквивалентного количества ПУТ, что неблагоприятно сказывается на состоянии окружающей среды.

Главной задачей при дувании пылеугольного топлива является обеспечение полноты его сгорания в пространстве фурменных очагов [3 – 14]. Для ее решения выполнено исследование влияния различных факторов на полноту сгорания ПУТ в фурменном очаге, температуру и состав горнового газа. Построена математическая модель фурменного очага доменной печи, которая учитывает закономерности теплообмена и движения газов в нижней части печи, химические реакции с участием кокса и частиц угольной пыли. Результатом моделирования являются распределения температур, скоростей газа и концентраций веществ  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2O$  и  $H_2$  по длине фурменного очага, скорость газификации кокса, полнота выгорания частиц угольной пыли. Разработанное на основе математической модели программное обеспечение предоставляет технологу доменного цеха инструмент для подбора оптимального расход ПУТ, крупности помола его частиц и других параметров.

### **ГИПОТЕЗА О ДВИЖЕНИИ ГАЗОВ В ФУРМЕННОМ ОЧАГЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

С точки зрения системного анализа доменная печь является сложной системой, при декомпозиции которой можно рассматривать следующие подсистемы: движение шихтовых материалов и газов, теплообмен, восстановление железорудных материалов, плавление агломерата и окатышей, горение кокса в фурменной зоне. Для подсистемы горения кокса в фурменном очаге входными параметрами являются характеристики комбинированного дутья, технический состав, физические и физико-химические свойства кокса, а также геометрические размеры фурм и горна печи. Изменение температуры, скорости газа и концентраций компонентов газовой фазы вдоль оси фурмы представляют собой выходные параметры подсистемы. При математическом моделировании инъекции угольной пыли в горн доменной печи были рассмотрены закономерности процессов, протекающих в подсистеме горения кокса в фурменном очаге [15].

Фурменный очаг представляет собой свободную от кокса полость вблизи фурмы с примыкающей к нему оболочкой толщиной в 4 – 6 диаметров куска кокса. Существуют два основных подхода к пониманию процессов в фурменном очаге. Согласно первому из них после задувки печи при определенном значении кинетической энергии дутья перед фурмой возникает полость, имеющая почти сферическую форму. В этой полости

газы осуществляют вихревое движение, увлекая за собой куски кокса. В ходе циркуляционного движения куски кокса сгорают, и на их место из промежуточного слоя (100 – 200 мм) поступают новые.

Альтернативная гипотеза состоит в следующем. В момент времени после задувки печи движение газа в рабочем пространстве фурменной зоны происходит в фильтрационном режиме. У фурмы выделяется осевая линия тока, вдоль которой скорость движения газа максимальна. Вдоль этой линии процесс горения кокса протекает наиболее интенсивно, в результате чего образуется зона повышенной порозности слоя. При повышении расхода дутья увеличивается объем зоны повышенной порозности слоя и по принципу наименьшей работы газы устремляются именно в эту зону на том основании, что на этом пути сопротивление движению газов минимально.

Поэтому в зоне повышенной порозности образуется свободная от кокса каверна, которая по мере повышения расхода дутья превращается в изогнутую, постепенно расширяющуюся фурменную полость (рис. 1). На некотором удалении от среза фурмы формируется изогнутая конфигурация полости свода, в которой движение газов почти вертикально. Этот свод весьма устойчив, именно на нем сгорает большая часть кокса. Поверхность фурменной зоны, прилегающая к фурме, напротив, динамически неустойчива, поэтому в поток дутья из нее периодически обрушиваются куски кокса.

При математическом моделировании исследуется двумерное поле скоростей газа в фурменном очаге. Вертикальная составляющая скорости принята постоянной и пропорциональной горизонтальной. Процессы горения рассматривают как совокупность параллельно развивающихся явлений горения кокса в слое, одиночных кусков кокса и частиц угольной пыли.

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ФУРМЕННОМ ОЧАГЕ**

Математическая модель фурменного очага доменной печи построена на основе методики, изложенной в ра-

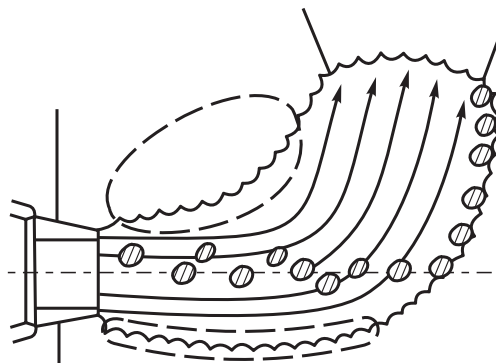


Рис. 1. Фурменный очаг

Fig. 1. Combustion zone

ботах [15 – 18]. Она состоит из двух подсистем: нагрев частиц угольной пыли и выделение летучих в фурменном очаге; теплообмен и процесс горения в фурменном приборе. Рассмотрим основные уравнения подсистемы фурменного очага.

Уравнение баланса общей массы газа имеет следующий вид:

$$-\frac{d\rho v_x S(x)}{dx} = \rho v_y \Pi(x) \xi + S(x) \left[ \sum_{i=1}^5 M_i \omega_i + \pi(\varphi_k d_k)^2 N_k \sum_{i=1}^5 \omega_{ik}^* + \pi \sum_{i=1}^5 (\varphi_j d_j)^2 N_j \sum_{i=1}^5 \omega_{ij}^* \right] + S(x) \left[ (\rho_{\text{II}} v_{\text{II}})_1 \delta(x - x_1) - (\rho_{\text{II}} v_{\text{II}})_2 \delta(x - x_2) \right] + \frac{\pi S(x)}{6} \sum_{j=1}^J \rho_j (\varphi_j d_j)^3 N_j v_j dL_j, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $v_x, v_y$  – компоненты скорости газа в двумерной математической модели, м/с;  $S(x)$  и  $\Pi(x)$  – площадь и периметр фурменного очага на элементарном участке с координатой  $x$ , м<sup>2</sup> и м;  $M_i$  – молярная масса компонентов газа (O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O), кг/моль;  $\xi$  – доля поверхности фурменного очага, через которую газ уходит вверх (параметр настройки модели), доли ед.;  $\omega_i, \omega_{ik}^*$  и  $\omega_{ij}^*$  – скорость реакции при взаимодействии  $i$ -го компонента с оболочкой фурменного очага, одиночными кусками кокса и частицами угольной пыли соответственно (здесь и далее индекс  $j$  относится к фракции угольной пыли), кг/(м<sup>3</sup>·с);  $\varphi_k$  и  $\varphi_j$  – коэффициент формы частиц кокса и частиц угольной пыли, доли ед.;  $d_k$  и  $d_j$  – диаметр частиц кокса и частиц угольной пыли, м;  $N_k$  и  $N_j$  – счетная концентрация частиц кокса и частиц угольной пыли, шт/м<sup>3</sup>;  $x_1$  – место ввода рециркулята в поток дутья, м;  $x_2$  – место вывода рециркулята, м;  $\rho_{\text{II}}$  и  $v_{\text{II}}$  – плотность и расход рециркулята, кг/м<sup>3</sup> и м<sup>3</sup>/с;  $\delta$  – функция Хевисайда, ед.;  $\rho_j$  – плотность  $j$ -го компонента угольной пыли, кг/м<sup>3</sup>;  $v_j$  – расход  $j$ -го компонента угольной пыли, м<sup>3</sup>/с;  $J$  – общее число фракций частиц угольной пыли, шт.;  $dL_j$  – изменение массовой доли летучих в частицах угольной пыли, доли ед.; индексы величин  $(\rho_{\text{II}} v_{\text{II}})_1$  и  $(\rho_{\text{II}} v_{\text{II}})_2$  означают значение на оси фурменного очага в соответствующем сечении.

Уравнение баланса массы  $i$ -го компонента газа имеет следующий вид:

$$\rho v_x \frac{dy_i}{dx} = \left[ \sum_{i=1}^5 M_i \omega_i + \pi(\varphi_k d_k)^2 N_k \sum_{i=1}^5 \omega_{ik}^* + \pi \sum_{i=1}^5 (\varphi_j d_j)^2 N_j \sum_{i=1}^5 \omega_{ij}^* \right] - M_i \omega_i - \pi(\varphi_k d_k)^2 N_k \sum_{i=1}^5 \omega_{ij}^* - \pi \sum_{i=1}^5 (\varphi_j d_j)^2 N_j \sum_{i=1}^5 \omega_{ij}^*, \quad (2)$$

где  $y_i$  – массовая доля компонента газовой фазы, доли ед.

Уравнение теплового баланса включает статьи теплообмена излучением и конвекцией, выделения теплоты вследствие физико-химических превращений и горения летучих. Оно имеет следующий вид:

$$-\frac{d\rho v_x S(x) c T}{dx} = \rho v_y \Pi(x) \xi c T - S(x) \times \left[ c_k T_k \sum_{i=0}^3 M_i W_i^* + \sum_{i=0}^4 M_i W_i^* (-\Delta H_i) - \alpha_{\text{фo}} f (T - t_k) \right] + \varepsilon \sigma_0 \Pi(x) \left[ (T + 273)^4 + (t_k + 273)^4 \right] - S(x) \pi(\varphi_k d_k)^2 N_k \left[ \sum_{i=0}^3 W_{ik} (-\Delta H_i) + c_k t_{\text{ч.к.}} \sum_{i=0}^3 W_{ik} - \alpha_k (T - t_{\text{ч.к.}}) \right] + \pi \sum_{j=1}^J (\varphi_j d_j)^2 N_j \times \left[ \sum_{i=0}^3 W_{ij} (-\Delta H_i) + c_j t_j \sum_{i=0}^3 W_{ij} - \alpha_j (T - t_j) \right] - (\rho c T)_{\text{II1}} \delta(x - x_1) + (\rho c T)_{\text{II2}} \delta(x - x_2) + \frac{\pi}{6} \sum_{j=1}^J \rho_j (\varphi_j d_j)^3 N_j v_j Q_j dL_j, \quad (3)$$

где  $c, c_k$  и  $c_j$  – удельная теплоемкость газа, кокса и частиц угольной пыли, Дж/(кг·К);  $T, t_k, t_{\text{ч.к.}}$  и  $t_j$  – температура газа, кокса в коксовой оболочке, частицы кокса и частицы угольной пыли, °С;  $W_i^*, W_{ik}$  и  $W_{ij}$  – общие скорости реакций в оболочке фурменного очага, в одиночных кусках кокса и в частицах угольной пыли соответственно, кг/(м<sup>3</sup>·К);  $\sigma_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $\Delta H_i$  – тепловой эффект  $i$ -й реакции, Дж/кг;  $\alpha_{\text{фo}}, \alpha_k$  и  $\alpha_j$  – коэффициенты конвективной теплоотдачи от оболочки фурменного очага, частицы кокса и частицы угольной пыли соответственно, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $f$  – поверхность фронта реакции на  $j$ -ой частице угольной пыли, м<sup>2</sup>;  $\varepsilon$  – эффективная степень черноты в системе газ – оболочка фурменного очага, доли ед.;  $Q_j$  – теплота сгорания летучих, Дж/(м<sup>3</sup>·К); индексы величин  $(\rho c T)_{\text{II1}}$  и  $(\rho c T)_{\text{II2}}$  означают значение на оси фурменного очага в соответствующем сечении.

Уравнение движения частицы можно записать в виде:

$$\frac{d\vec{v}_\psi}{d\tau} = \frac{C_D \text{Re}_\psi}{24\tau_p} (\vec{v} - \vec{v}_\psi) + \left( 1 + \frac{\rho}{\rho_\psi} \right) g \vec{G}, \quad (4)$$

где  $\vec{v}_\psi$  – скорость частицы кокса или угольной пыли;  $C_D$  – аэродинамическое сопротивление;  $\tau_p$  – время релаксации;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\vec{G}$  – единичный орт силы тяжести.

Индекс  $\psi$  означает, что за расчетную величину принимается средний по поверхности диаметр частицы.

Уравнение нагрева частицы содержит те же слагаемые, что и выражение теплообмена для газа, и имеет вид:

$$\frac{m_{\psi} c_{\psi}}{\pi(\varphi_{\psi} d_{\psi})^2} \frac{dt_{\psi}}{dx} = \sum_{i=0}^3 W_{i\psi} (-\Delta H_i) + \alpha_{\psi} (T - t_{\psi}) + \varepsilon_{\text{пр}} \sigma_0 \Pi(x) \left[ (t_k + 273)^4 + (t_{\psi} + 273)^4 \right] + \sum_{l=1}^L \frac{W_{lj} (-\Delta H_{lj})}{\pi(\varphi_{\psi} d_{\psi})^2}, \quad (5)$$

где  $m_{\psi}$  – масса частицы, кг;  $c_{\psi}$  – теплоемкость частицы, Дж/К;  $\varphi_{\psi}$  – коэффициент формы частицы, доли ед.;  $d_{\psi}$  – диаметр частицы, м;  $W_{i\psi}$  – общая скорость реакций с частицами угольной пыли, кг/(м<sup>3</sup>·с);  $\alpha_{\psi}$  – коэффициент конвективной теплоотдачи от газа к поверхности частицы, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $t_{\psi}$  – температура частицы, °С;  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты в системе газ – оболочка фурменного очага – частица, доли ед.;  $L$  – общее число химических реакций, шт.;  $W_{lj}$  – общая скорость реакции выделения летучих, кг/(м<sup>3</sup>·с);  $\Delta H_{lj}$  – тепловой эффект реакции выделения летучих, Дж/кг.

Для расчета скоростей химических реакций (окисления углерода, Будуара и взаимодействия углерода с водяными парами) использовали подход, изложенный в работе [19]. Принимаем, что энергия активации реакции Будуара в 2,2 раза, а реакции взаимодействия углерода с водяными парами в 1,6 раз больше энергии активации реакции горения углерода. Также используется допущение, что графики зависимости константы скорости реакции от температуры для разных сортов угля сходятся в одной точке, называемой полюсом горения. В этом случае константа скорости однозначно зависит от энергии активации соответствующей реакции. Сами координаты полюса горения являются параметрами настройки модели.

Характеристики комбинированного дутья на срезе фурмы принимаются в качестве граничных условий

приведенных уравнений. Начальные параметры (расход, химический состав и физические свойства) частиц угольной пыли являются выходными параметрами подсистемы нагрева частиц угольной пыли и выделения летучих в фурменном приборе. Уравнения этой подсистемы строятся аналогично уравнениям подсистемы фурменного очага. Принимается, что в фурменном приборе химических реакций с углеродом угольной пыли не происходит, они идут только с летучими компонентами. Математическая модель нагрева частиц угольной пыли и выделения летучих в фурменном приборе представлена в работе [20].

Для численного решения приведенных уравнений использовался метод Рунге-Кутты [21] четвертого порядка в сочетании с методом итераций.

### ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ

На основе представленной математической модели создано программное обеспечение (ПО), позволяющее исследовать влияние различных факторов на температурные и концентрационные поля в фурменном очаге, подобрать рациональный режим работы при вдувании ПУТ. Разработка ПО выполнена в среде Visual Studio 2017 в виде проекта Windows Forms на языке программирования C#.

Главное окно программы представлено на рис. 2. Окно ввода исходных данных представлено на рис. 3. Исходные данные разделены на три категории: параметры доменной печи (геометрические размеры горна печи и фурм); технологические параметры (характеристики комбинированного дутья, свойства кокса); параметры угольной пыли. Для каждой категории существует свой набор вариантов расчета, который отображается в списке на каждой вкладке.

При вводе нового варианта исходных данных или выборе существующего в главном окне программы будут отображены краткие результаты расчета:

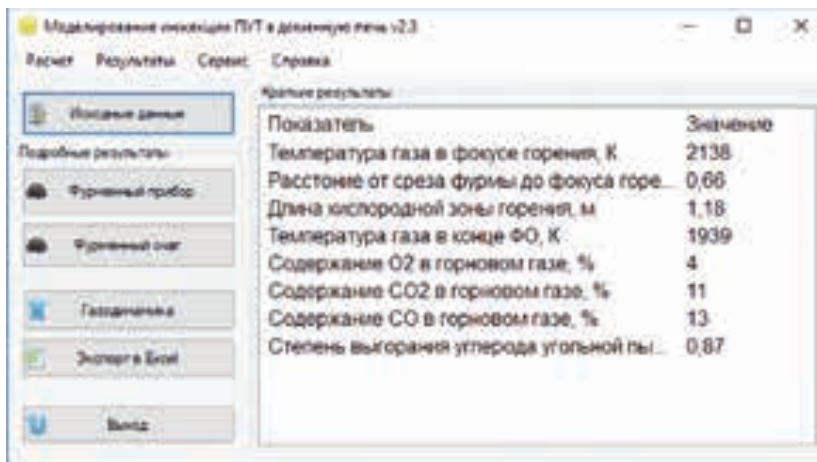


Рис. 2. Главное окно программы

Fig. 2. Main program window

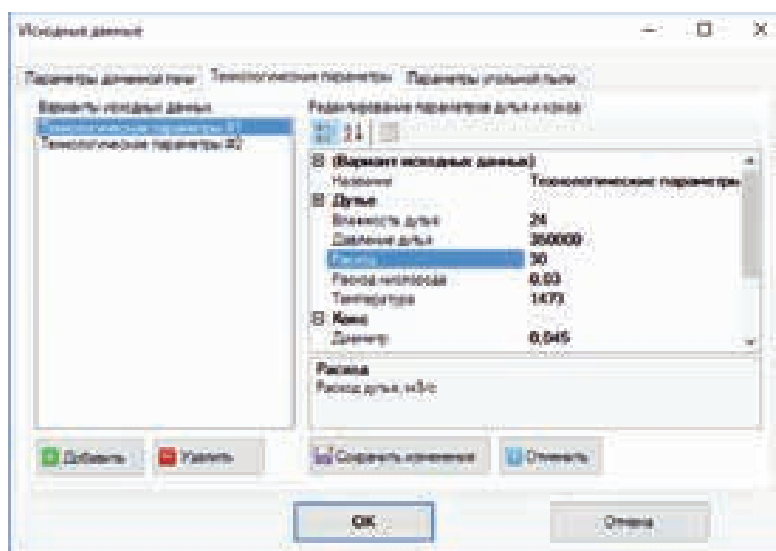


Рис. 3. Окно «Ввод исходных данных»

Fig. 3. Initial Data Input window

- максимальная температура газа в фурменном очаге;
- расстояние от среза фурмы до фокуса горения;
- протяженность кислородной зоны горения, в которой концентрация кислорода превышает 5 %;
- температура газа в конце фурменного очага;
- содержание кислорода, диоксида и монооксида углерода в горновом газе на выходе из фурменного очага;
- степень выгорания углерода ПУТ на выходе из фурменного очага.

Максимальная температура газа достигается в фокусе горения в месте, где содержание углекислоты в газе достигает максимума.

Хранение одновременно нескольких вариантов исходных данных удобно использовать для сравнения результатов расчета. Для просмотра подробных результатов моделирования подсистемы фурменного очага и подсистемы теплообмена, а также процессов горения в фурменном приборе используются закладки «Фурменный очаг» и «Фурменный прибор». Подробные результаты при моделировании протекающих процессов в фурменном приборе включают графики и таблицы распределения расчетных величин (температур газа и частиц угольной пыли; скорости частиц угольной пыли и степени выгорания летучих) вдоль оси фурмы. Подробные результаты при моделировании фурменного очага включают графики и таблицы распределения расчетных величин (температуры газа; содержания соединений  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$  в газовой фазе; расхода газа; скорости газификации углерода кокса; температуры частиц угольной пыли; степени выгорания частиц ПУТ) вдоль оси фурменного очага. Окно просмотра подробных результатов моделирования подсистемы теплообмена и процессов горения в фурменном приборе представлено на рис. 4.

В базе данных программы хранится справочник углей, который можно редактировать через интерфейс программы (рис. 5). В приложении существует возможность экспорта результатов расчета во внешний файл программы для работы с электронными таблицами Microsoft Excel.

#### **АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ**

В табл. 1 показано влияние расхода ПУТ на основные характеристики фурменного очага. По полученным результатам можно сделать вывод, что с увеличением расхода пылеугольного топлива снижается температура в фокусе горения и в конце фурменного очага. Поэтому для компенсации снижения температуры горения необходимо увеличение температуры горячего дутья или повышение содержания кислорода в нем. При повышении расхода ПУТ уменьшается протяженность кислородной зоны горения, а точка фокуса горения приближается к срезу фурмы.

В табл. 2 показано влияние содержания летучих в угле на параметры фурменного очага. По полученным результатам можно сделать вывод, что угли с большим содержанием летучих выгорают полнее.

В результате моделирования и исследования влияния инъекции ПУТ на характеристики фурменного очага сделаны следующие выводы:

- при вдувании ПУТ снижается температура горения в фурменном очаге, поэтому для ее выравнивания необходимо увеличение температуры дутья или повышение содержания кислорода в нем;
- при вдувании ПУТ фокус горения приближается к фурме, поэтому необходимо учитывать его стойкость;
- для обеспечения полноты выгорания углерода угольной пыли в пределах фурменного очага необ-

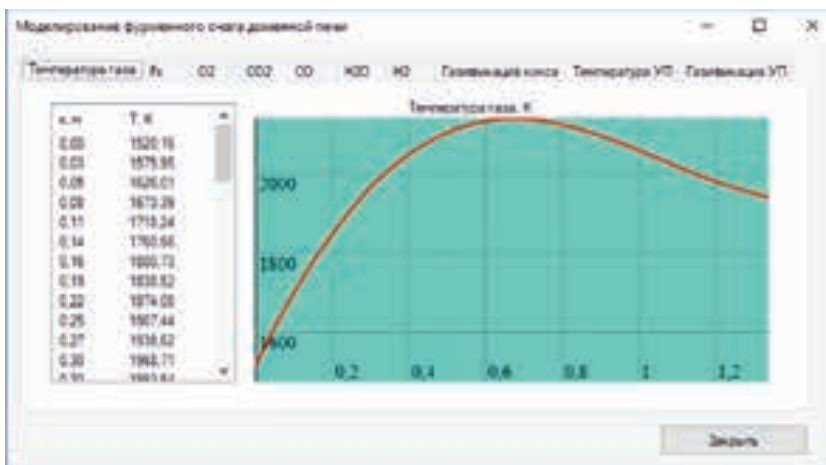


Рис. 4. Окно «Просмотр подробных результатов»

Fig. 4. Detailed Results View window

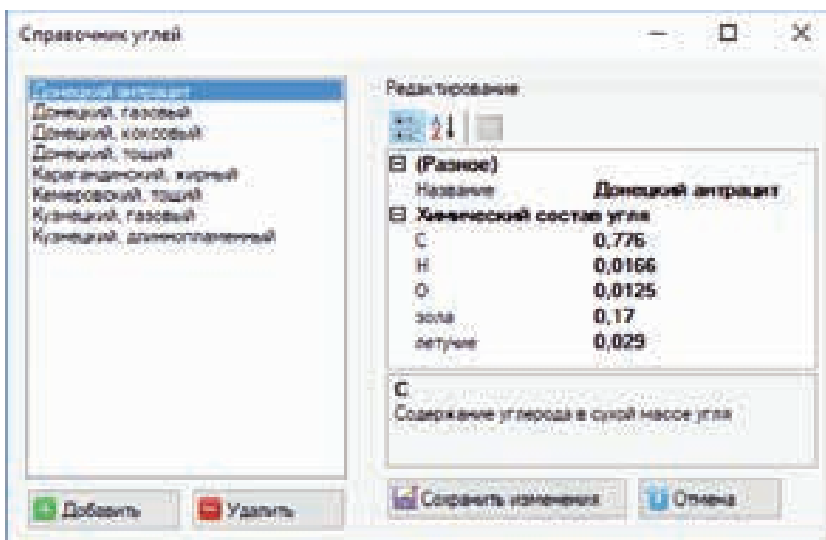


Рис. 5. Окно «Редактирование справочника углей»

Fig. 5. Coal Guide Editing window

Т а б л и ц а 1

**Параметры фурменного очага при различных расходах ПУТ**

Table 1. Parameters of combustion zone at different PCF consumption

Параметр	Значение параметра при расходе, г/м <sup>3</sup> , ПУТ			
	2	4	6	8
Температура газа в фокусе горения, К	2151	2147	2144	2140
Расстояние от среза фурмы до фокуса горения, м	0,74	0,71	0,68	0,68
Протяженность кислородной зоны горения, м	1,31	1,26	1,23	1,20
Температура газа в конце фурменного очага, К	1983	1972	1960	1949
Содержание кислорода в горновом газе, %	5	5	4	4
Содержание диоксида углерода в горновом газе, %	12	12	12	11
Содержание монооксида углерода в горновом газе, %	9	10	11	12
Степень выгорания углерода угольной пыли на выходе из фурменного очага, доли	0,86	0,85	0,84	0,82

## Параметры фурменного очага при различном содержании летучих в угле

Table 2. Parameters of combustion zone at different volatile contents in coal

Параметр	Значение параметра при содержании, %, летучих в угле			
	5	10	20	30
Температура газа в фокусе горения, К	2130	2132	2135	2138
Расстояние от среза фурмы до фокуса горения, м	0,68	0,68	0,66	0,66
Длина кислородной зоны горения, м	1,20	1,20	1,20	1,18
Температура газа в конце фурменного очага, К	1943	1942	1940	1939
Содержание кислорода в горновом газе, %	4	4	4	4
Содержание диоксида углерода в горновом газе, %	11	11	11	11
Содержание монооксида углерода в горновом газе, %	13	13	13	13
Степень выгорания углерода угольной пыли на выходе из фурменного очага, доли	0,59	0,62	0,71	0,81

ходимо использовать уголь с содержанием летучих 20 – 40 % и крупностью помола частиц 0,10 – 0,15 мм; – точка ввода угольной пыли в поток дутья должна находиться на расстоянии не менее одного метра от среза фурмы.

**Выводы**

Разработанная информационно-моделирующая система предназначена для исследования влияния различных факторов на состояние фурменных очагов доменных печей, работающих с инъекцией пылеугольного топлива. Программное обеспечение может быть использовано технологами доменного цеха при подборе допустимых значений технологических параметров.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

- Ефименко Г.Г., Гиммельфарб А.А., Левченко В.Е. *Металлургия чугуна. Учеб. для вузов.* – Киев: Выща школа Головное изд-во, 1988. – 351 с.
- Плискановский С.Т., Полтавец В.В. *Оборудование и эксплуатация доменных печей.* – Днепропетровск: Пороги, 2004. – 495 с.
- Дунаев Н.Е., Кудрявцева З.М., Кузнецов Ю.М. *Вдувание пылевидных материалов в доменные печи.* – М.: *Металлургия*, 1977. – 208 с.
- Kochura V.V., Yaroshevskii S.L., Kuppenko V.I., Mishin I.V. Method of determining the degree of combustion of pulverized-coal fuel in blast furnaces // *Metallurgist*. 2013. Vol. 57. No. 7-8. P. 671 – 681.
- Kochura V., Yaroshevskiy S., Popov V., Braga V. Fundamentals aspects and industrial practice of coal injection in the blast furnace at Donetsk Metallurgical Works. – In: 4<sup>th</sup> International Congress on the Science and Technology of Ironmaking. 2006. P. 331 – 334.
- De Castro J.A., da Silva A.J., Sasaki Y., Yagi J. A six-phases 3-D model to study simultaneous injection of high rates of pulverized coal and charcoal into the blast furnace with oxygen enrichment // *ISIJ Int*. 2011. Vol. 51. No. 5. P. 748 – 758.
- Chung J.K., Han J.W., Lee J.H. Coke properties at tuyere level in blast furnace with pulverized coal injection // *Metals and Materials*. 1996. Vol. 2. No. 1. P. 1 – 7.
- Jiang X., Li J., Qiu J. Study on combustion characteristic of micro-pulverized coal // *Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao*. 2000. Vol. 20. No. 6. P. 71 – 74.
- Tovarovskii I.G., Merkulov A.E. Blast-furnace smelting with coal-dust injection // *Steel in Translation*. 2012. Vol. 42. No. 1. P. 28 – 40.
- Tovarovskii I.G., Merkulov A.E. Analysis of blast-furnace smelting with the injection of natural gas and coke-oven gas // *Steel in Translation*. 2012. Vol. 42. No. 1. P. 28 – 40.
- Su B.X., Zhang J.L., Liu Q.Y., Che X.-M., Fu Y.D., Jin J.Q. Study on the combustion process of pulverized coal and carbonaceous matter dust in BF // *Materials Science and Technology Conference and Exhibition*. 2011. Vol. 1. P. 536 – 544.
- Zolotukhin Y.A., Andreichikov N.S., Kukolev Y.B. Quality requirements on coke for blast furnaces operating with coal-dust fuel // *Coke and Chemistry*. 2009. Vol. 52. No. 3. P. 110 – 115.
- Wu K., Ding R., Han Q., Yang S., Wei S., Ni B. Research on unconsumed fine coke and pulverized coal of BF dust under different PCI rates in BF at capital steel Co // *ISIJ International*. 2010. Vol. 50. No. 3. P. 390 – 395.
- Jaffarullah R., Ghosh B.K. Alternate fuels in blast furnaces to reduce coke consumption // *Journal of the Institution of Engineers*. 2005. Vol. 86. Part: Metallurgy and Material Science Division. P. 16 – 23.
- Введение в системный анализ теплофизических процессов в металлургии. Учеб. пособие для вузов / Н.А. Спириин, В.С. Швыдкий, В.И. Лобанов, В.В. Лавров. – Екатеринбург, УГТУ, 1999. – 205 с.
- Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П. Онорин, Н.А. Спириин, В.Л. Терентьев и др.; под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. – 301 с.
- Спириин Н.А., Швыдкий В.С., Овчинников Ю.Н., Лавров В.В. Математическое моделирование теплообмена в фурменном очаге доменной печи // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1998. Т. 41. № 4. С. 51 – 53.
- Pavlov A.V., Polinov A.A., Spirin N.A., Onorin O.P., Lavrov V.V. Use of model systems for solving new technological problems in blast-furnace production // *Metallurgist*. 2017. Vol. 61. No. 5-6. P. 448 – 454.
- Основы практической теории горения / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
- Швыдкий В.С., Быков А.Г., Луговых Г.А., Карымов Р.Р. Газификация частиц угольной пыли в фурменном приборе доменной печи // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2008. Т. 51. № 4. С. 7 – 10.
- Волков Е.А. Численные методы. Учеб. пособие для вузов. – М.: Наука, 1987. – 248 с.

Поступила в редакцию 23 мая 2019 г.  
После доработки 29 мая 2019 г.  
Принята к публикации 13 июня 2019 г.

## DEVELOPMENT OF INFORMATION MODELING SYSTEM OF COAL-DUST FUEL INJECTION INTO TUYERES OF BLAST FURNACE

*V.S. Shvydkii, S.P. Kudelin, I.A. Gurin, V.Yu. Noskov*

Ural Federal University named after the first President of Russia  
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** The article considers a mathematical model of combustion zone of blast furnace working with the use of injection of coal-dust fuel. In this model, two subsystems were identified: 1) subsystem of heating the particles of coal dust and volatiles release in the combustion zone; 2) subsystem of heat exchange and combustion processes in the tuyere. A two-dimensional velocity field of gas in the combustion zone was investigated. The combustion processes are considered as a set of simultaneously developing phenomena of coke burning in a layer, single pieces of coke and particles of coal dust. The model includes following equations: total gas mass balance, gas component mass balance, gas heat balance, movement of coal dust particles and heat balance of coal dust particles. The model calculates maximum burning temperature in combustion zone; the distance from the cut of the tuyere to the focus of combustion; the length of the oxygen combustion zone; gas temperature; the content of gas phase components and the degree of carbon burnout of pulverized coal at the outlet of the tuyere combustion zone. Information-modeling system has been developed. It allows investigation of influence of combined blast characteristics, the properties of coke and coal-dust fuel, the geometric dimensions of tuyeres and other factors on temperature fields and concentrations of components of gas phase in combustion zone. The model also helps to select a rational mode of pulverized coal that will ensure completeness of its combustion in the tuyere combustion zone. Main functions of the program are as follows: representation of results of calculation in form of tables and diagrams, storage of options of basic data in a database and export of results of calculation to Microsoft Excel. Conclusions were made on reduction of combustion temperature in combustion zone and the approach of focus of combustion to the tuyere when pulverized coal was injected. The authors also have established the need to use coals with certain quality characteristics and place where coal dust was introduced into the blast stream.

**Keywords:** blast furnace, coal-dust fuel, injection, combustion, modeling, combustion zone, software.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2019-12-979-986

### REFERENCES

1. Efimenko G.G., Gimmel'farb A.A., Levchenko V.E. *Metallurgiya chuguna. Ucheb. dlya vuzov* [Ironmaking. Textbook for universities]. Kiev: Vyscha shkola, 1988, 351 p. (In Russ.).
2. Pliskanovskii S.T., Poltavets V.V. *Oborudovanie i ekspluatatsiya domennykh pechei* [Equipment and operation of blast furnaces]. Dnepropetrovsk: Porogi, 2004, 495 p. (In Russ.).
3. Dunaev N.E., Kudryavtseva Z.M., Kuznetsov Yu.M. *Vdvanie pylevidnykh materialov v domennye pechi* [Blasting of pulverized materials into blast furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1977, 208 p. (In Russ.).
4. Kochura V.V., Yaroshevskii S.L., Kuppenko V.I., Mishin I.V. Method of determining the degree of combustion of pulverized-coal fuel in blast furnaces. *Metallurgist*. 2013, vol. 57, no. 7-8, pp. 671–681.
5. Kochura V., Yaroshevskiy S., Popov V., Braga V. Fundamentals aspects and industrial practice of coal injection in the blast furnace at Donetsk Metallurgical Works. In: *4<sup>th</sup> Int. Congress on the Science and Technology of Ironmaking*, 2006, pp. 331–334.
6. De Castro J.A., da Silva A.J., Sasaki Ya., Yagi J. A six-phases 3-D model to study simultaneous injection of high rates of pulverized coal and charcoal into the blast furnace with oxygen enrichment. *ISIJ International*. 2011, vol. 51, no. 5, pp. 748–758.
7. Chung J.K., Han J.W., Lee J.H. Coke properties at tuyere level in blast furnace with pulverized coal injection. *Metals and Materials*. 1996, vol. 2, no. 1, pp. 1–7.
8. Jiang X., Li J., Qiu J. Study on combustion characteristic of micro-pulverized coal. *Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao*. 2000, vol. 20, no. 6, pp. 71–74.
9. Tovarovskii I.G., Merkulov A.E. Blast-furnace smelting with coal-dust injection. *Steel in Translation*. 2012, vol. 42, no. 1, pp. 28–40.
10. Tovarovskii I.G., Merkulov A.E. Analysis of blast-furnace smelting with the injection of natural gas and coke-oven gas. *Steel in Translation*. 2012, vol. 42, no. 1, pp. 28–40.
11. Su B.X., Zhang J.L., Liu Q.Y., Che X.-M., Fu Y.D., Jin J.Q. Study on the combustion process of pulverized coal and carbonaceous matter dust in BF. *Materials Science and Technology Conf. and Exhibition*. 2011, vol. 1, pp. 536–544.
12. Zolotukhin Y.A., Andreichikov N.S., Kukolev Y.B. Quality requirements on coke for blast furnaces operating with coal-dust fuel. *Coke and Chemistry*. 2009, vol. 52, no. 3, pp. 110–115.
13. Wu K., Ding R., Han Q., Yang S., Wei S., Ni B. Research on unconsumed fine coke and pulverized coal of BF dust under different PCI rates in BF at capital steel Co. *ISIJ International*. 2010, vol. 50, no. 3, pp. 390–395.
14. Jaffarullah R., Ghosh B.K. Alternate fuels in blast furnaces to reduce coke consumption. *Journal of the Institution of Engineers*. 2005, vol. 86, Part: Metallurgy and Material Science Division, pp. 16–23.
15. Spirin N.A., Shvydkii V.S., Lobanov V.I., Lavrov V.V. *Vvedenie v sistemnyi analiz teplofizicheskikh protsessov v metallurgii. Ucheb. posobie dlya vuzov* [Introduction to systematic analysis of thermo-physical processes in metallurgy. University manual]. Ekaterinburg, UGTU, 1999, 205 p. (In Russ.).
16. Onorin O.P., Spirin N.A., Terent'ev V.L. etc. *Komp'yuternye metody modelirovaniya domennogo protsessa* [Computer methods of blast furnace process modeling]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg: UGTU–UPI, 2005, 301 p. (In Russ.).
17. Spirin N.A., Shvydkii V.S., Ovchinnikov Yu.N., Lavrov V.V. Mathematical modeling of heat transfer in combustion zone of blast furnace. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1998, vol. 41, no. 4, pp. 51–53. (In Russ.).
18. Pavlov A.V., Polinov A.A., Spirin N.A., Onorin O.P., Lavrov V.V. Use of model systems for solving new technological problems in blast-furnace production. *Metallurgist*. 2017, vol. 61, no. 5-6, pp. 448–454.
19. Pomerantsev V.V., Aref'ev K.M., Akhmedov D.B. etc. *Osnovy prakticheskoi teorii gorenija* [Fundamentals of the practical theory of combustion]. Leningrad: Energoatomizdat, 1986, 312 p. (In Russ.).
20. Shvydkii V.S., Bykov A.G., Lugovykh G.A., Karymov R.R. Gasification of coal dust particles in a blast furnace unit. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2008, vol. 51, no. 4, pp. 7–10. (In Russ.).
21. Volkov E.A. *Chislennyye metody. Ucheb. posobie dlya vuzov* [Numerical methods. University manual]. Moscow: Nauka, 1987, 248 p. (In Russ.).

### Information about the authors:

*V.S. Shvydkii, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (vladimirshvydkij0@gmail.com)*

*S.P. Kudelin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (s.p.kudelin@urfu.ru)*

*I.A. Gurin, Assistant of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (ivan.gurin@urfu.ru)*

*V.Yu. Noskov, Senior Lecturer of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (vynoskov@gmail.com)*

Received May 23, 2019

Revised May 29, 2019

Accepted June 13, 2019