

УДК 669.162.1

Managing Iron and Steel Works Ore Base Formation Through Integration of the Blast-Furnace Process and Agglomerate Failure Models

**Mikhail Yu. Ryabchikov,
Vera V. Grebennikova and Elena S. Ryabchikova***
*Magnitogorsk State Technical University by G.I.Nosov
38 Lenin, Magnitogorsk, 455000, Russia*

Received 05.06.2016, received in revised form 09.10.2016, accepted 24.12.2017

The paper addresses the issue of optimizing ore feedstock base to operate iron and steel works. It is shown that fluctuating ore feedstock base assessed on the basis of drum cold mechanical strength index TI can result in falling short in achieving the optimal economic values of agglomeration and blast-furnace process. A method of combined use of the stress model of solid inclusion in matrix and the failure model based on the Rittinger's law is suggested to account for effects of varying feedstock agglomerates on agglomeration and on efficiency of the blast-furnace process. The metallurgic agglomerate failure model also accounts for combined use of the stress model developed for solid inclusions in matrix. The algorithmic issues dealing with complex models integration are addressed. The calculation results are provided to estimate the change in the blast furnace production efficiency when agglomerates made of various ore materials are used. The comparison of agglomerates having different strength expressed through TI index is made.

Keywords: ore feedstock base, quality of metallurgical agglomerate, management, blast-furnace process, production efficiency, coke consumption.

Citation: Ryabchikov M.Yu, Grebennikova V.V., Ryabchikova E.S. Managing iron and steel works ore base formation through integration of the blast-furnace process and agglomerate failure models, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2018, 11(2), 168-180. DOI: 10.17516/1999-494X-0020.

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: mr_mgn@mail.ru, greb1981@mail.ru, mika.elena@mail.ru

Управление формированием рудной базы металлургического предприятия на основе интеграции моделей доменного процесса и разрушения агломерата

М.Ю. Рябчиков, В.В. Гребенникова, Е.С. Рябчикова

*Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова
Россия, 455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38*

В статье рассмотрены проблемы, связанные с формированием рудной базы металлургического предприятия. Показано, что при непостоянстве рудной сырьевой базы предприятия оценка полезности агломерируемого сырья с позиции барабанного индекса холодной механической прочности TI может не обеспечить достижение оптимальных экономических показателей аглодоменного производства. Для учета индивидуальных особенностей влияния агломератов из различного сырья на производительность доменного процесса предложен способ интеграция модели доменного процесса с моделью разрушения металлургического агломерата, основанной на комбинированном использовании модели напряженного состояния твердого включения в матрице и модели разрушения на основе закона Риттингера. Рассмотрены алгоритмические сложности организации интеграции и поиска решения. Приведены результаты расчетов изменения производительности доменной печи при разрушении агломератов из различных рудных материалов, обладающих различной прочностью при испытании, на барабанный индекс прочности TI.

Ключевые слова: рудная сырьевая база предприятия, качество металлургического агломерата, доменный процесс, расход кокса.

Введение

В настоящий момент при сравнении полезности рудных материалов, используемых в доменном процессе после их агломерации, как правило, оперируют усредненными эффектами влияния качественных характеристик агломерата на среднюю производительность и расход кокса в доменном процессе [1]. Основными показателями оценки качества агломерата являются индексы: механической холодной прочности TI (Tumble Index согласно ISO 3271); восстановимости RI (Reductive Index согласно ISO 4695); прочности после восстановления RDI (Grounding strength in temperature recovery по ISO 4696 – 1).

На рис. 1 приведены результаты расчетов [2] влияния восстановимости и прочности железорудных материалов на технико-экономические показатели доменной печи №9 «ММК» относительно базового варианта работы печи в 2009 г. Представленные зависимости являются усредненными и не предполагают учета рудной принадлежности материалов, используемых при агломерации.

В работе [3] предложена модель разрушения металлургического агломерата, основанная на комбинированном использовании модели напряженного состояния твердого включения в матрице и модели разрушения на основе закона Риттингера. Определены нагрузки, действующие на куски агломерата в испытательном барабане, и предложен способ адаптации модели

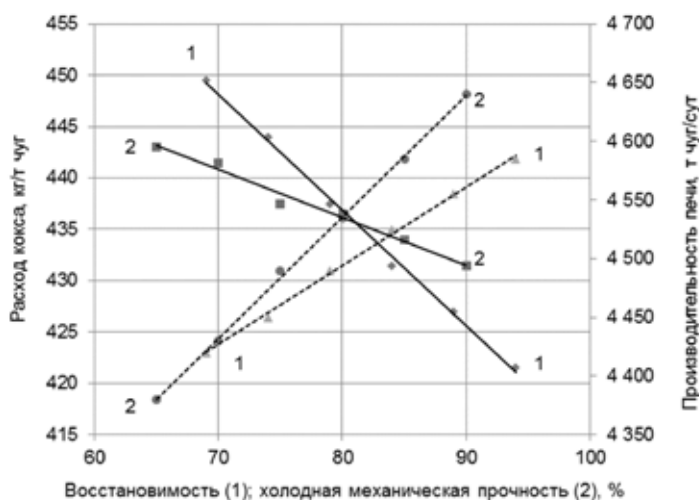


Рис. 1. Рассчитанное в [2] влияние восстановимости (1) и холодной прочности (2) на расход кокса (—) и производительность (- - -) для условий доменной печи №9 ОАО «ММК»

Fig. 1. Effect of the reducibility (1) and cold crushing strength (2), calculated in [2], on the coke consumption (—) and production rate (- - -) for conditions of blast furnace No. 9 of OJSC Magnitogorsk Iron & Steel Works

разрушения агломерата с использованием данных о гранулометрических характеристиках продуктов испытаний. При адаптации предложено использовать вероятностные распределения параметров модели разрушения. Получены зависимости этих параметров от основности агломерата, содержания углерода в шихте и крупности известняка. Важным результатом работы является получение неоднозначных значений параметров настройки модели при равном значении индекса TI для агломератов из разных материалов.

При условии стабильной рудной базы использование усредненных эффектов влияния на эффективность доменного процесса оправданно. В то же время в текущих экономических условиях взаимоотношения с поставщиками рудных материалов могут отличаться нестабильностью [4].

Например, теперь аглофабрики «ММК» получают усредненную смесь из рудных материалов более чем ста различных месторождений и, исходя из ее параметров, выполняют дозирование топлива и известняка, что является основными управляющими воздействиями на качество агломерата. Для уточнения индивидуальных эффектов влияния механической прочности агломератов из различных железорудных материалов на эффективность доменного процесса при формировании рудной базы предприятия необходима интеграция модели разрушения агломерата [3] с моделью доменного процесса.

Интеграция модели разрушения агломерата в модель доменного процесса

В доменной печи можно выделить две зоны – косвенного восстановления железа и прямого восстановления. В первой (верхней) зоне большое влияние на перепад давления газов оказывает гранулометрический состав шихты и механическая прочность агломерата. Во второй (нижней) зоне важна горячая прочность компонентов шихты, которая характеризует способ-

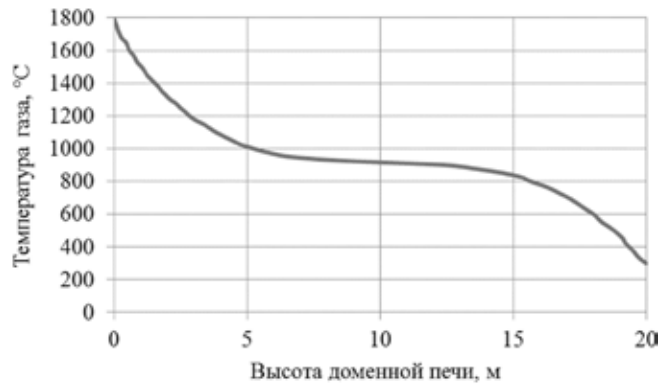


Рис. 2. Принятое допущение о распределении температур по высоте ДП: $t = -0,0019H^5 + 0,1085H^4 - 2,94H^3 + 41,9H^2 - 299,9H + 1778$, °C

Fig. 2. Accepted assumption concerning the temperature distribution along the blast furnace height: $t = -0,0019H^5 + 0,1085H^4 - 2,94H^3 + 41,9H^2 - 299,9H + 1778$, °C

ность материалов сопротивляться нагрузке при высоких температурах. Модель разрушения агломерата [3] ориентирована на верхнюю зону. Поэтому рассмотренный далее расчет учитывает гранулометрический состав в верхней части печи, а для нижней части расчет ведется согласно методике, предложенной в [5].

Модель разрушения [3] определяет статистические вероятностные распределения геометрических и прочностных параметров кусков агломерата, представленных заданным количеством (20 тыс.), разрушение которых по мере движения в шахте доменной печи требуется промоделировать.

Для выполнения приближенных расчетов принято фиксированное распределение температур по высоте доменной печи (ДП) №9 ОАО ММК, изображенное на рис. 2, согласующееся с данными [6, 7]. Принятая высота нижней зоны определяется высотой распара и заплечиков и составляет $H_{\text{расп}} + H_{\text{запл}} = 5$ м, а высота верхней зоны $H_{\text{ш}} = 15$ м при общей рабочей высоте 20 м.

Согласно [8] приняты следующие газодинамические параметры базового режима: избыточное давление дутья 2,5 атм.; избыточное давление на колошнике 1,3 атм.; верхний перепад давления 0,3 атм.; нижний перепад давления 0,9 атм.; общий перепад давления 1,2 атм.; расход горячего дутья 60 м³/с; температура горячего дутья 1200 °C. Согласно [5] зависимость сопротивления слоя шихты в нижней части доменной печи с учетом параметров шихты и дутья для базового варианта доменной плавки выражается уравнением вида

$$A_{\text{низ}} = \frac{\Delta P_{\text{низ}}}{F_{\text{д}}^2} \approx 25, \quad (1)$$

где $A_{\text{низ}}$ – коэффициент потери давления в зоне размягчения, Па·с²/м⁶; $\Delta P_{\text{низ}}$ – нижний перепад давления, Па; $F_{\text{д}}$ – объемный расход горячего дутья, м³/с.

Коэффициент $A_{\text{низ}}$ использовали для упрощенного учета влияния нижней зоны на изменение перепада давления при изменении расхода дутья.

Для описания газодинамических процессов в верхней зоне принято известное уравнение С. Эгона (S. Ergun) [9]:

$$\Delta P = \psi \frac{w^2}{2} \rho_r \frac{\Delta H (1 - \varepsilon_{ш})}{d_{\text{экв.ш}} \varepsilon_{ш}^2} \frac{T}{273} \frac{1}{(1 + P)}, \quad (2)$$

где ΔP – перепад давления в слое исследуемого элемента, Па; ψ – коэффициент сопротивления слоя шихты; w – скорость газа через слой шихты, м/с; ρ_r – плотность газа (воздуха), кг/м³; ΔH – высота столба (слоя) шихты, м; $d_{\text{экв.ш}}$ – эквивалентный диаметр кусков шихты, м; $\varepsilon_{ш}$ – порозность шихты, отн. ед.; T – температура газа в исследуемом слое, °C; P – давление газа в исследуемом слое, Па.

Исходя из (2) и ряда работ, где используются схожие выражения [6, 10-12], следует зависимость перепада давления от порозности, эквивалентного диаметра кусков шихты и коэффициента сопротивления.

Эквивалентный диаметр может быть рассчитан из ситового состава материалов, по которому определяется свернутый диаметр частиц [10], а порозность – из насыпной и кажущейся плотности материала [13]:

$$d_{\text{экв}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{d_i}}, \quad \varepsilon = 1 - \frac{\gamma_n}{\gamma_{\text{каж}}} = 1 - \frac{4}{\pi D^2 \Delta H} \cdot \frac{m}{\gamma_{\text{каж}}}, \quad (3)$$

где $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр, мм; a_i – объемная доля фракции, попавшей в i -ый интервал, отн. ед.; d_i – середина i -го интервала диаметров кусков, мм; γ_n , $\gamma_{\text{каж}}$ – насыпная и кажущаяся плотность материала, кг/м³ ($\gamma_{\text{каж}} = 3,34$ для агломерата); $4/(\pi \cdot D^2 \Delta H)$ – величина, обратная объему исследуемого слоя материалов в печи, 1/м³; m – масса материала в объеме слоя, кг.

Порозность агломерата и кокса определяли по зависимостям [11, 13, 14]:

$$\varepsilon_a = 0,403 \cdot d_{\text{экв.а}}^{0,14} = 0,403 \cdot \left[1 / \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{d_i} \right]^{0,14}, \quad \varepsilon_k = 0,222 \cdot d_{\text{экв.к}}^{0,252}, \quad (4)$$

где ε_a – порозность агломерата, отн. ед.; $d_{\text{экв.а}}$ – эквивалентный диаметр кусков агломерата в объеме исследуемого элемента, мм; ε_k – порозность кокса, отн. ед.; $d_{\text{экв.к}}$ – эквивалентный диаметр кусков кокса в объеме исследуемого сегмента, мм.

Очевидно, что при моделировании разрушения материалов в ДП необходимо учитывать разрушение всех компонентов, включая неотъемлемый компонент – кокс, объемная доля которого в шихте значительна. В то же время модель [3] ориентирована на разрушение агломерата. На основании выражения

$$M_k = M_k^0 + 0,1441 \cdot V_{\text{пол}}^{0,24} \cdot \alpha_3 M_{-10}, \quad (5)$$

где M_k^0 – исходная массовая доля мелочи в коксе, %; M_{-10} , M_{+25} – показатели прочности кокса по ГОСТ 5953-93, %; α_3 – коэффициент учет влияния мелочи, можно найти среднее значение мелочи кокса $M_{\text{к.ср}}$ при ($M_{-10} = 8,5$ % [15, 16]; $M_k^0 = 3$ %; $V_{\text{пол}} = 2014$ м³) по высоте верхней зоны доменной печи. Принимая допущение о линейном характере увеличения доли мелочи кокса по высоте шахты, определим долю мелочи в нижней части зоны косвенного восстановления (6), что позволяет рассчитать долю мелочи в любом слое по высоте:

$$M_{\text{к.низ}} = 2 \cdot M_{\text{к.ср}} - M_{\text{к.верх}}, \quad (6)$$

где $M_{\text{к.низ}}$ – массовая доля мелочи кокса в нижней части зоны косвенного восстановления, %; $M_{\text{к.верх}}$ – исходная массовая доля мелочи – 5мм в коксе, %.

Для расчета эквивалентного диаметра кусков кокса в зависимости от доли мелочи выполнили анализ экспериментальных данных работы [15] по распределению крупности кусков кокса на разных ступенях разрушения в барабане Сундгрена (рис. 3а), что позволило получить зависимость среднего диаметра кусков кокса от доли мелочи – 5мм (рис. 3б). Параметры порозности и эквивалентного диаметра окатышей приняты на постоянном уровне.

В доменной печи потоки шихты и газа находятся в противотоке и их встречное движение возможно только при соблюдении определенных условий, одним из которых является ровный сход шихтовых материалов, характеризующийся определенной степенью уравнивания (СУ) шихты газовым потоком. В работе [5] для расчета СУ предложено выражение

$$СУ = \frac{F_r}{F_{\text{ш}}} = \frac{K_r \Delta P \cdot S}{V_a \cdot \gamma_{\text{н}}^{\text{III}}} = \frac{K_r \Delta P \cdot S}{S \cdot H_a \cdot \gamma_{\text{н}}^{\text{III}}} = \frac{K_r \Delta P}{H_a \gamma_{\text{н}}^{\text{III}}}, \quad (7)$$

где H_a – высота (активного) слоя шихты от уровня воздушных фурм до уровня шихты в печи, м; ΔP – перепад давления газов по высоте активной части, атм.; $\gamma_{\text{н}}^{\text{III}}$ – насыпная масса шихты, т/м³; S – площадь поперечного сечения печи, м²; K_r – параметр адаптации (≈ 10).

Наличие информации о размерах кусков материалов в процессе их разрушения позволяет перейти от площади поперечного сечения печи в (7) к эффективной площади (сечения) кусков S_{Σ} в каждом сегменте по высоте верхней части печи:

$$S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{k_1} \sum_{j=1}^{k_2} S_{i,j}, \quad S_{i,j} = \pi \cdot R_{i,j}^2 \cdot N_{i,j}, \quad (8)$$

где $S_{i,j}$, $R_{i,j}$, $N_{i,j}$ – эффективная площадь, радиус и число кусков i -й фракции j -го компонента шихты; k_1 , k_2 – число интервалов размеров кусков и число компонентов шихты.

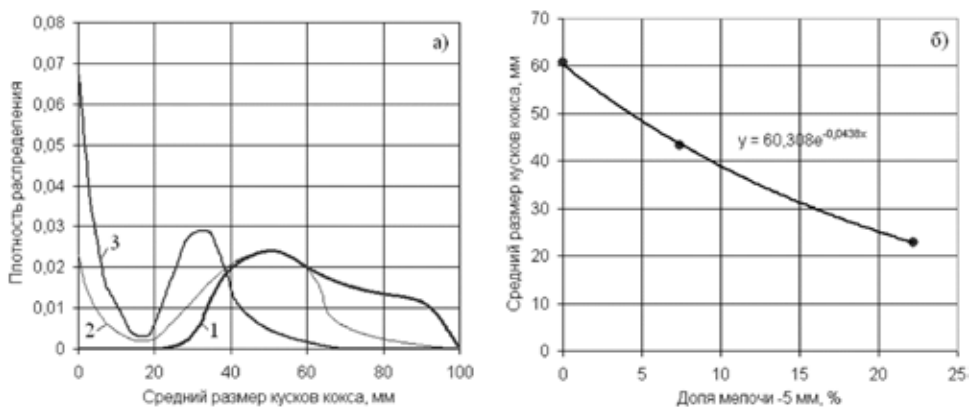


Рис. 3. Распределение крупности кусков кокса на разных ступенях разрушения в барабане Сундгрена (1,2,3 – начало, середина и завершающая стадия испытаний) (а) и рассчитанная зависимость среднего диаметра кусков кокса в зависимости от доли мелочи – 5 мм (б)

Fig. 3. a) Distribution of the coke lump size at different fracture stages in a Sundgren drum (1, 2, 3 – beginning, middle and completion test stages); б) calculated dependence of the mean coke lump diameter on the share of smalls – 5 mm

При выполнении настройки модели на базовый режим параметр K_T упрощенно приняли одинаковым для каждого сегмента по высоте, фракции и компонентам шихты.

Алгоритм расчетов модели газодинамических процессов доменной печи в верхней зоне представлен на рис. 4. На рис. 5 изображена структурная схема взаимодействия параметров блоков модели.

Сложностью используемой схемы расчетов является то, что для первоначального расчета перепадов давления и степеней уравнивания нет данных о разрушении кусков агломерата и порозности шихты по высоте доменной печи. Поэтому перед началом расчета принимается фиксированная линейная зависимость изменения порозности шихты и эквивалентного диаметра кусков агломерата и кокса по высоте верхней зоны доменной печи.

Расчет перепада давления происходит снизу вверх по слоям. Рассчитываются текущая плотность газового потока ρ_{gas} , его объемный расход $F_{\text{vol,dut}}$ и динамическая вязкость μ . По формуле (2) вычисляется перепад давления ΔP в текущем слое высотой $\Delta H=1\text{м}$. Для следующего сегмента на высоте давление внизу слоя, с учетом потерь в нижележащем, равно $P = P - \Delta P$, далее производится вычисление перепада давлений с шагом расчета ΔH до верха доменной печи.

Затем рассчитывают степень уравнивания шихты СУ восходящим потоком газа. При этом слои перебираются напротив сверху вниз для определения силы Q_n давления на материалы текущего слоя верхними слоями, расчета разрушения кусков и определения эквивалентного диаметра кусков агломерата $d_{\text{экв.а}}$ и кокса. Находится новая порозность агломерата ϵ_a , насыпная плотность агломерата $\rho_{\text{нас.а}}$ для каждого слоя и пересчитываются объемные доли компонентов шихты φ_a, φ_k в исследуемом сегменте объемом V_{seg} .

Расчет повторяется циклически (5-10 циклов) до получения установившегося решения по перепадам давления ΔP по высоте доменной печи и порозности шихты $\epsilon_{\text{ш}}$.

На рис. 6 показано изменение рассчитанных по модели параметров по высоте верхней части доменной печи №9 ОАО «ММК» для шихты из смеси Соколовского агломерата (49 % по массе), кокса (28 %) и окатышей (23 %) при индексе прочности агломерата $TI = 70$. Общее среднее значение степени уравнивания шихты (с учетом СУ нижней зоны) составило 0,56 при коэффициенте $K_T = 0,08$.

Разработанная модель позволяет оценить влияние принадлежности агломерационного сырья к различным месторождениям на СУ доменного процесса при одинаковом индексе холодной механической прочности. В таблице 1 приведены данные об изменении: СУ; расхода дутья, обеспечивающего $SU = 0,57$, стандартное отклонение которого составило 0,96 м³/с, или 1,57 %; производительности и расхода кокса согласно эффектам в [1].

Из данных табл. 1 следует значимое влияние рудной принадлежности агломерационного сырья на производительность доменной печи.

На основе зависимостей настроек модели разрушения агломерата от индекса TI в [3] можно оценить влияние на эффективность доменного процесса изменения механической прочности агломерата в достаточно широком диапазоне. На рис. 7а видно, что влияние индекса TI на производительность доменной печи неоднозначно и может быть как линейным, так и значимо отличным от линейной зависимости.

На рис. 7б результаты расчета по изменению производительности доменной печи представлены в форме зависимостей от содержания углерода в агломерационном процессе, полученных

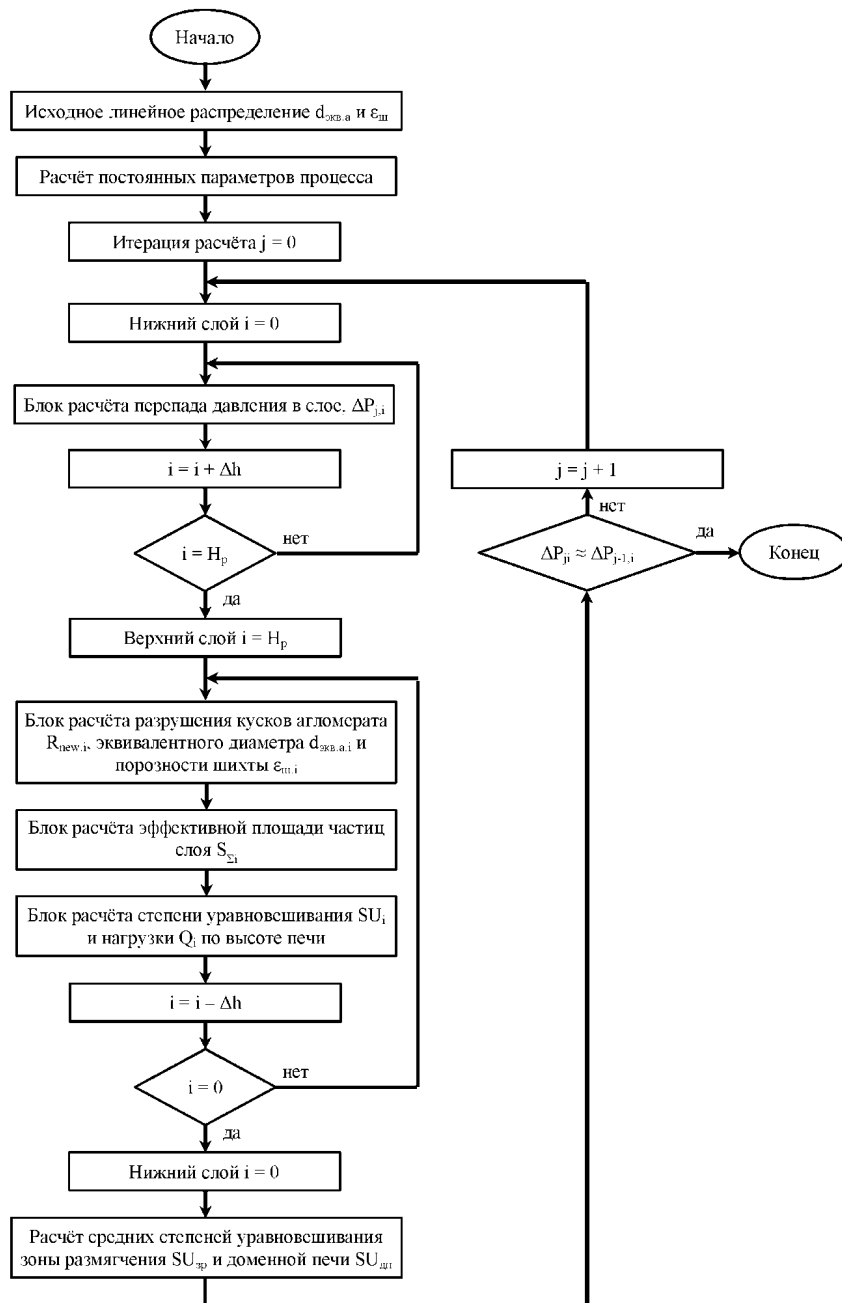


Рис. 4. Алгоритм расчетов модели газодинамических процессов доменной печи в верхней зоне

Fig. 4. Algorithm of model calculations of gas-dynamic processes in the upper zone of the blast furnace

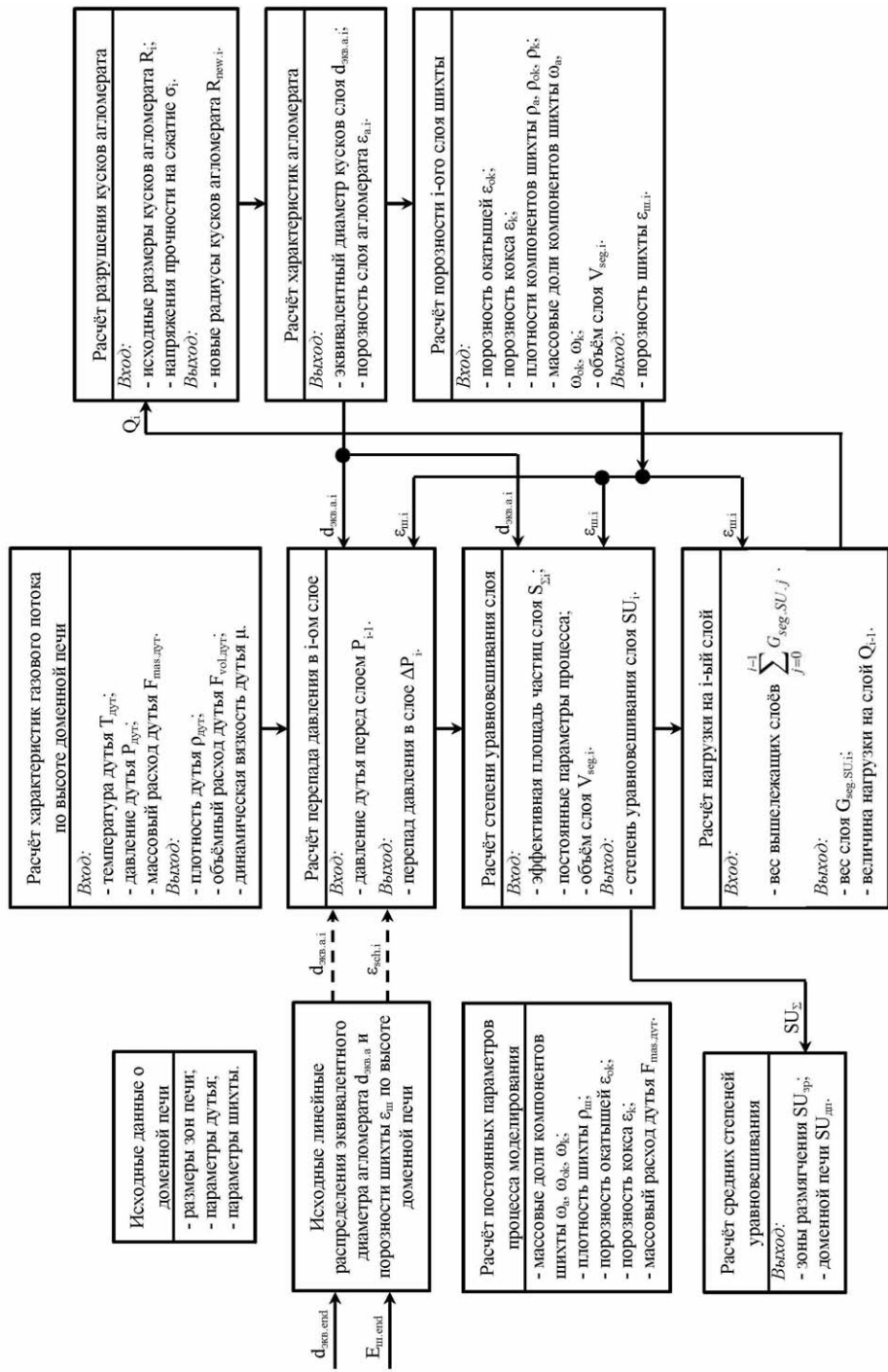


Рис. 5. Структурная схема взаимодействия параметров блоков модели при расчетах

Fig. 5. Structural scheme of the interaction of parameters of model units in calculations

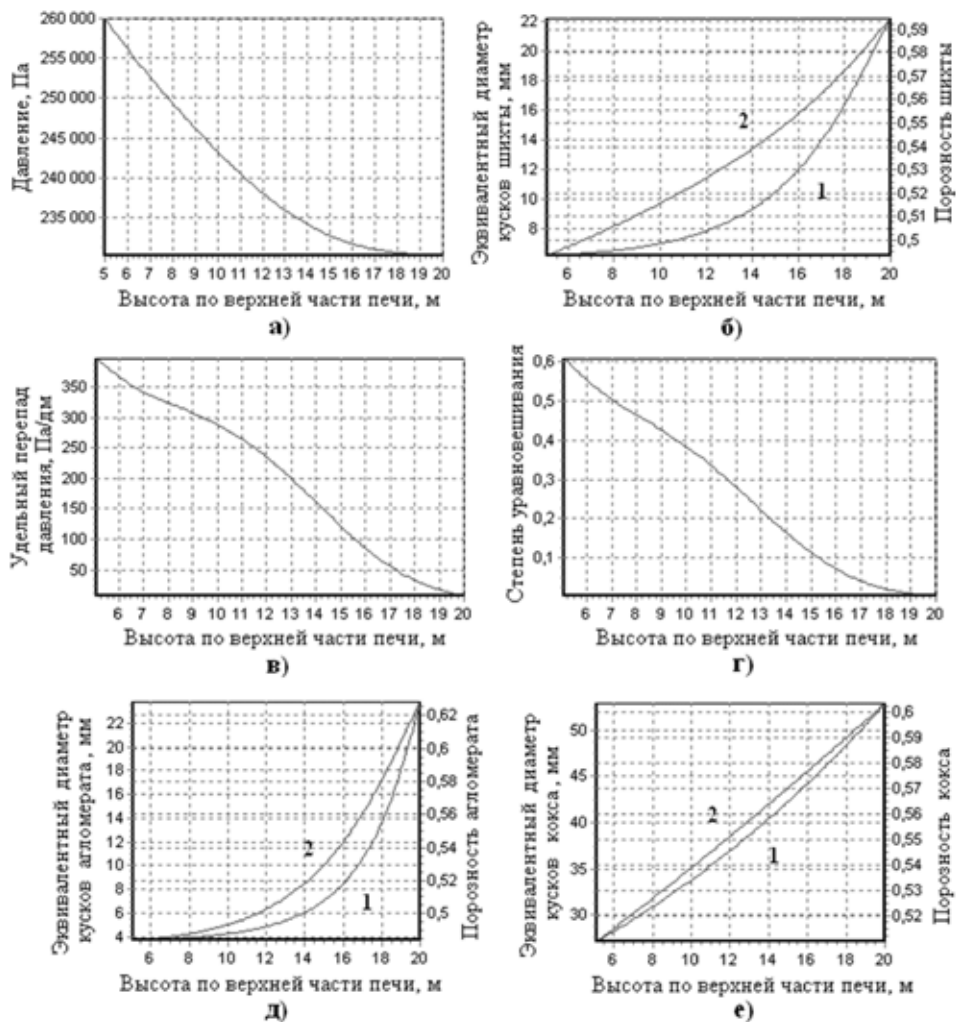


Рис. 6. Изменение рассчитанных по модели параметров по высоте верхней части доменной печи №9 ОАО «ММК» для шихты из смеси Соколовского агломерата (49 % по массе), кокса (28 %) и окатышей (23 %) при индексе прочности агломерата $TI = 70$: а – давление, Па; б – эквивалентный диаметр кусков шихты, мм; в – удельный перепад давления, Па/дм; г – степень уравнивания; д-е – эквивалентный диаметр (мм) и порозность агломерата и кокса (1 – диаметр; 2 – порозность)

Fig. 6. Change in parameters calculated as per the model along the height of the upper part of blast furnace No. 9 of OJSC Magnitogorsk Iron & Steel Works for the furnace charge made of mixture of Sokolovskoye agglomerate (49 % by weight), coke (28 %) and pellets (23 %) at agglomerate strength index $TI = 70$: a) pressure, Pa; б) equivalent diameter of furnace charge lumps, mm; в) specific differential pressure, Pa/dm; г) balance degree; д-е) equivalent diameter (mm) and fractional void volume of the agglomerate and coke (1 – diameter; 2 – fractional void volume)

Таблица 1. Рассчитанное влияние рудной принадлежности агломерационного сырья на показатели доменного процесса при $TI = 70 (\pm 0,1)$

Table 1. Calculated effect of ore belonging to the agglomeration of feedstock on the values of the blast-furnace process at $TI = 70$

№	Принадлежность рудных материалов	Основность	СУ	Q_d^* (m^3/c) при СУ = 0,57	ΔTI , %	ΔK^* , %
1	Оленегорский концентрат	0,3	0,563	60,40	-0,93	0,044
2		0,75	0,557	60,80	-0,42	0,020
3		1,2	0,558	60,80	-0,42	0,020
4	Высокогорская аглоруда	0,1	0,524	62,60	1,89	-0,091
5		1,2	0,528	62,41	1,64	-0,079
6	Соколовская аглоруда	0,1	0,565	60,27	-1,09	0,052
7		1,2	0,560	60,60	-0,67	0,032

* Q_d , ΔTI , ΔK – расход дутья, изменение производительности печи.

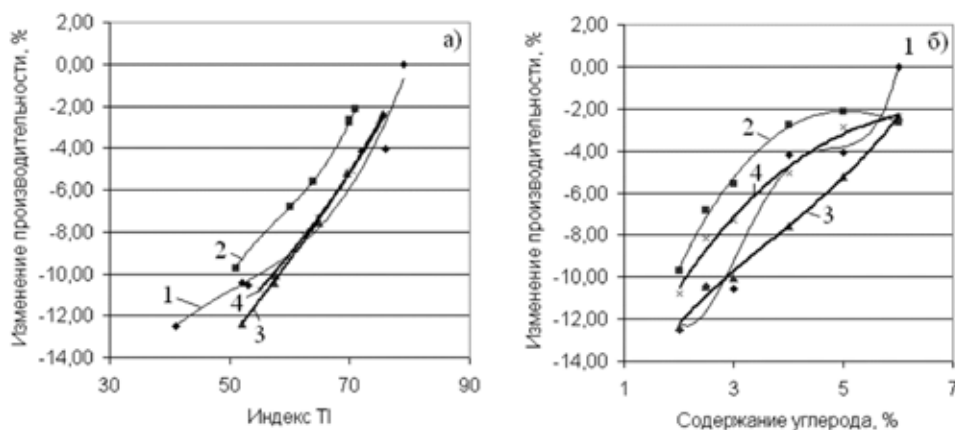


Рис. 7. Рассчитанные зависимости снижения производительности доменной печи от индекса TI (а) и содержания углерода при агломерации (б) по отношению к режиму использования агломерата из Высокогорской руды при $TI = 79$ для агломератов из: 1 – Высокогорской руды, $B = 1,2$; 2 – Высокогорской руды, $B = 0,1$; 3 – Соколовской руды, $B = 1,2$; 4 – Соколовской руды, $B = 0,1$

Fig. 7. Calculated dependences of the blast furnace production rate decrease on TI index (a) and carbon content in agglomeration (b) in relation to regime of the agglomerate use from Vysokogorskoye ore at $TI = 79$ for agglomerates of: 1 – Vysokogorskoye ore, $B = 1.2$; 2 – Vysokogorskoye ore, $B = 0.1$; 3 – Sokolovskoye ore, $B = 1.2$; 4 – Sokolovskoye ore, $B = 0.1$

с использованием моделей [16, 17]. Из формы зависимостей видно, что при нестабильной сырьевой базе поддержание на постоянном уровне содержания углерода топлива в агломерационной шихте может приводить к значимым колебаниям производительности доменной печи, что снижает стабильность доменного процесса.

Заключение

Основным результатом интеграции моделей доменного процесса и модели разрушения агломерата является возможность решения задач формирования рудной базы предприятия с

учетом индивидуальной эффективности использования агломератов из различного сырья в доменном процессе, что актуально в условиях непостоянной сырьевой базы.

Из полученных результатов следует относительно слабое влияние непостоянства газодинамических режимов доменной печи на удельный расход кокса в доменном процессе, что объясняется низким значением используемого усредненного коэффициента из работы И.Г. Товаровского [1], предполагающего изменение удельного расхода кокса 0,2 % на 10 кПа изменения общего перепада давления. Однако нужно учитывать, что рост механической прочности может сопровождаться в отдельных случаях ростом горячей прочности и изменением восстановимости. Учет данных явлений наряду с вероятностными характеристиками распределений показателей качества агломерата позволяет в перспективе повысить эффективность систем управления формированием рудной базы металлургического предприятия и планирования режимов работы доменных печей.

Список литературы

[1] Товаровский И.Г. Нормативная оценка влияния параметров доменной плавки на расход кокса и производительность. *Сталь*, 2014, 5, 4-11 [Tovarovskii I.G. Regulatory impact assessment parameters on blast furnace coke consumption and productivity. *Steel*, 2014, 5, 4-11 (in Russian)]

[2] Дмитриев А.Н., Витькина Г.Ю., Чесноков Ю.А. Создание методических основ анализа влияния качественных характеристик железорудного сырья и кокса на технико-экономические показатели доменного процесса. *Физическая химия и технология в металлургии. Сборник трудов, посвященный 60-летию ИМЕТ УрО РАН. Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук*, Екатеринбург, 2015, 309-314 [Dmitriev A.N., Vit'kina G.Yu., Chesnokov Yu.A. Creation of methodical bases of the analysis of the influence of qualitative characteristics of iron ore raw materials and coke on technical and economic indicators of the blast furnace process. *Proceedings: Physical chemistry and technology in metallurgy. The manifold published for the 60th anniversary of Metallurgy Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, Ekaterinburg, 2015, 309-314 (in Russian)]

[3] Рябчиков М.Ю., Гребенникова В.В., Рябчикова Е.С., Богданов Н.В. Модель разрушения металлургического агломерата. *Известия ВУЗов. Черная металлургия*, 2016, 3, 159-166 [Ryabchikov M.Yu., Grebennikova V.V., Ryabchikova E.S., Bogdanov N.V. Model of the metallurgical agglomerate failure. *News of Higher Educational Institutions. Ferrous metallurgy*, 2016, 3, 159-166 (in Russian)]

[4] Волков Ю.В., Соколов И.В., Смирнов А.А. Стратегия освоения сырьевых ресурсов Урала. *Горная промышленность*, 2006, 4, 57-62 [Volkov Yu.V., Sokolov I.V., Smirnov A.A. Strategy for Ural feedstock supply. *Mining industry*, 2006, 4, 57-62 (in Russian)]

[5] Спирин Н.А., Лавров В.В., Рыболовлев В.Ю., Гилева Л.Ю., Краснобаев А.В., Швыдкий В.С., Онорин О.П., Щипанов К.А., Бурькин А.А. *Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП*. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. 558 с. [Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Gileva L.Yu., Krasnobaev A.V., Shvydkii V.S., Onorin O.P., Shchipanov K.A., Burykin A.A. *Mathematic modeling of metallurgic processes in Automatic Process Control System*. Ekaterinburg, ООО «UIPTs», 2014. 558 p. (in Russian)]

- [6] Большаков В.И. *Познание процессов доменной плавки*. Днепропетровск: Пороги, 2006. 439 с. [Bol'shakov V.I. *Study of blast furnace smelting processes*. Dnepropetrovsk, Porogi, 2006. p. (in Russian)]
- [7] Паспорт доменной печи №9 ОАО «ММК». 1999. 28 с. [MDS for blast furnace No. 9 of OJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works. 1999. 28 p. (in Russian)]
- [8] Спирин Н.А. *Компьютерные методы моделирования доменного процесса*. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. 301 с. [Spirin N.A. *Computer methods for blast furnace smelting process modeling*. Ekaterinburg, UGTU-UPI, 2005. 301 p. (in Russian)]
- [9] Мухин Р.А. *Разработка теоретических основ поведения шихтовых материалов доменной плавки для информационного обеспечения математической модели загрузки доменной печи*. Москва: НИТУ МИСиС, 2010. 28 с. [Mukhin R.A. *Developing theoretical basis to optimize blast furnace smelting blended materials to provide the information for the mathematical model of the blast furnace charging*. Moskva, NITU MISiS, 2010. 28 p. (in Russian)]
- [10] Большаков В.И., Муравьева И.Г., Семенов Ю.С. *Применение радиолокационных систем измерения поверхности засыпи шихты для контроля и управления доменной плавкой*. Днепропетровск: Пороги, 2013. 364 с. [Bolshakov V.I., Murav'eva I.G., Semenov Yu.S. *Application of radar systems to analyze blended mixture stock-line for blast furnace smelting for control and management purpose*. Dnepropetrovsk, Porogi, 2013. 364 p. (in Russian)]
- [11] Ковшов В.Н., Петренко В.А. *Экспериментальные исследования движения шихты и газа в доменной печи*. Днепропетровск: Институт технологии, 1996. 124 с. [Kovshov V.N., Petrenko V.A. *Experimental study of the blended mixture and gas motion in blast furnace*. Dnepropetrovsk, Institut tekhnologii, 1996. 124 p. (in Russian)]
- [12] Тарасов В.П. *Газодинамика доменного процесса*. М.: Metallurgiya, 1982. 224 с. [Tarasov V.P. *Blast-furnace process gas dynamics*. Moskva: Metallurgiya, 1982. 224 p. (in Russian)]
- [13] Ковшов В.Н., Галаганов А.И., Чистяков В.Т. Исследование порозности многокомпонентной шихты, *Металлургия и коксохимия*. Днепропетровск: Техника, 1997, вып. 53, 34-37 [Kovshov V.N., Galaganov A.I., Chistyakov V.T. Study of the multi-component blended mixture void volume. *Proceedings: Cast iron metallurgy and coke chemistry*. Dnepropetrovsk: Tekhnika 1997, 53, 34-37 (in Russian)]
- [14] Kajiwara J. Development of Simulation Model for Burden Distribution of Blast Furnace Top, *Tr. ISS Jap.*, 1983, V. 23, 12, 1045-1052.
- [15] Иванов Е.Б., Мучник Д.А. *Технология производства кокса*. Киев: Вища школа, 1976. 232 с. [Ivanov E.B., Muchnik D.A. *Coke production technology*. Kiev, Vishcha shkola, 1976. 232 p. (in Russian)]
- [16] Ryabchikov M.Y., Grebennikova V.V. Simulation of the combined effect of production factors on metallurgical sinter mechanical strength. *Metallurgist*. 2013, 57, 3-4, 274-283
- [17] Гребенникова В. В., Рябчиков М. Ю., Бурдина О. В. Комплексный критерий оценки качества металлургического агломерата. *Автоматизированные технологии и производства*. 2013, 5, 163-169 [Grebennikova V. V., Ryabchikov M. Yu., Burdina O. V. Metallurgical agglomerate quality assessment complex criterion. *Automated technology and production*, 2013, 5, 163-169 (in Russian)]