

УДК 004.94+669.162.262.003.12

*Муравьева И.Г.<sup>а</sup>, Белошапка Е.А.<sup>а</sup>, Иванча Н.Г.<sup>а</sup>, Белькова А.И.<sup>а</sup>, Вишняков В.И.<sup>а</sup>,  
Ляшенко О.А.<sup>б</sup>*

## КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ФОРМЫ И ПОЛОЖЕНИЯ ПЛАСТИЧНОЙ ЗОНЫ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

<sup>а</sup> Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, г. Днепр, Украина

<sup>б</sup> ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепр, Украина

В работе представлена методика разработки критерия оценки формы и положения пластичной зоны в доменной печи в рамках созданной в Институте черной металлургии интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой. В качестве аргументов разработанного критерия приняты параметры, непосредственно отражающие форму, толщину и положение пластичной зоны в рабочем пространстве доменной печи. Предложена методика определения основных параметров пластичной зоны. Основным постулатом метода определения толщины пластичной зоны является положение, согласно которому контуры зон размягчения и плавления определяются линиями, соединяющими точки, соответствующие температурам начала размягчения и плавления железосодержащих материалов, находящихся в различных зонах рабочего пространства доменной печи. Показано, что основываясь на установленном с помощью разработанного ранее метода положении линии плавления, распределении компонентов шихты по сечению колошника, которое определяется с использованием комплексной модели, синтезированной из моделей загрузки–выгрузки материалов из бункера бесконусного загрузочного устройства (БЗУ) и модели радиального распределения материалов на колошнике печи, а также значении температур плавления различных смесей компонентов железорудной части шихты, образующихся при выгрузке их на колошник, рассчитываемых при помощи статистических моделей, определяется распределение температур плавления железосодержащих материалов в объеме печи. Приведены аналитические зависимости, полученные на основе анализа экспериментальных данных о температурах размягчения и плавления различных видов агломерата, окатышей и железной руды при восстановительно-тепловой обработке, которые могут быть использованы для прогнозирования высокотемпературных свойств железорудных материалов. Для определения положения точек линии размягчения разработан специальный алгоритм, основанный на предложенном способе определения параметров температурного поля в объеме доменной печи с использованием масштабного коэффициента распределения температур в объеме печи. Применение критерия позволяет оценивать параметры пластичной зоны в доменной печи и обосновывать выбор оптимальных управляющих воздействий на процесс доменной плавки.

**Ключевые слова:** доменная печь, пластичная зона, оптимизация, критерий, ход печи, площадь поверхности плавления.

DOI: 10.32434/2521-6406-2019-6-2-35-42

### *Постановка проблемы*

Как показано в публикациях ряда авторов, в том числе, по результатам выполненных на замороженных доменных печах (ДП) исследо-

ваний [1-16], существенное влияние на распределение и эффективность использования печных газов и на технико-экономические показатели плавки в целом оказывает формирующая-

ся в печи пластичная зона (ПЗ). В зависимости от распределения шихтовых материалов, их качества и параметров дутьевого режима, в доменной печи может быть сформирована пластичная зона различного профиля. Непосредственно контролировать формирование пластичной зоны в доменной печи не представляется возможным, поэтому актуальным является разработка аналитических методов определения формы и положения пластичной зоны, а также создание на их основе специального показателя для обоснования принятия управляющих воздействий на ход плавки [17]. Алгоритмы созданной в Институте черной металлургии (ИЧМ) интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой предусматривают возможность оценки формы и положения пластичной зоны в доменной печи с помощью такого специального показателя [18].

#### ***Анализ последних исследований и публикаций***

В литературных источниках отсутствует информация об аналогичных исследованиях по созданию целевых критериев оценки положения и формы пластичной зоны в доменной печи. Идеология создания интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой предусматривает оценку процессов доменной плавки с помощью целевых критериев, одним из которых является критерий оценки формы и положения пластичной зоны в доменной печи.

#### ***Формулирование цели исследования***

Целью представленных ниже исследований явилось представление этапов разработки критерия оценки формы и положения пластичной зоны в доменной печи для последующего его использования при диагностике хода печи и оценке правильности выбранных управляющих воздействий.

#### ***Изложение основного материала исследований***

При разработке критерия оценки формы и положения ПЗ в ДП принят, несколько отличающийся от использованного ранее при создании критериев оценки теплового и газодинамического режимов плавки, методический подход [1]. Выполненный анализ корреляционных связей показал наличие тесных связей параметров, характеризующих положение, форму и толщину ПЗ с производством, содержанием кремния в чугуне и с рядом других технологических параметров и показателей плавки. Так как, эти параметры, как правило, входят в состав других критериев оценки процессов плавки, для исклю-

чения их взаимовлияния в качестве аргументов критерия оценки формы и положения ПЗ, приняты параметры, непосредственно отражающие ее форму, толщину и положение в рабочем пространстве ДП.

Методика определения основных параметров пластичной зоны заключается в следующем. В результате ранее выполненных в ИЧМ исследований разработан метод определения положения ПЗ в ДП, основанный на установленной связи изменения границ ПЗ с вариацией скоростей опускания шихтовых материалов на колошнике, рассчитываемых с помощью системы измерения профиля поверхности засыпи шихты, и оцениваемых по величине их среднеквадратичного отклонения (СКО) в каждой кольцевой зоне [17].

Согласно методу принято, что расстояние ( $H_{пл}$ ) от уровня воздушных фурм, рассчитанное в каждой зоне, как произведение установленного временного интервала между максимальными значениями СКО скорости ( $t_{max}$ ), и усредненного за этот интервал значения скорости опускания шихты ( $V_{ср,max}$ ), характеризует положение рассматриваемой точки линии начала образования жидких фаз в слое железорудных материалов. На основании полученных отклонений точек линии начала образования жидких фаз (линии плавления) оценивается изменение положения ПЗ по высоте и радиусу ДП.

Исследования последних лет позволили разработать метод определения толщины ПЗ, основным постулатом которого является положение, согласно которому контуры зон размягчения и плавления определяются линиями, соединяющими точки, соответствующие температурам начала размягчения и плавления железосодержащих материалов, находящихся в различных зонах рабочего пространства доменной печи. Исходя из установленного положения линии плавления, определяется распределение температур плавления железосодержащих материалов в объеме печи. Необходимой для этого информацией является распределение компонентов шихты по сечению колошника, которое определяется с использованием комплексной модели, синтезированной из моделей загрузки – выгрузки материалов из бункера бесконусного загрузочного устройства (БЗУ) и модели радиального распределения материалов на колошнике печи, а также значения температур плавления различных смесей компонентов железорудной части шихты, образующихся при выгрузке их на колошник, определяемые при по-

мощи статистических моделей [19,20].

Температура плавления смеси железосодержащих материалов ( $T_{p\text{ см}}$ ), определяется по формуле:

$$T_{p\text{ см}} = \frac{\sum_j T_p^j \cdot M^j}{\sum_j M^j}, \quad (1)$$

где  $T_p^j$  – температура плавления  $j$ -го компонента смеси, °C;  $M^j$  – масса  $j$ -го компонента в смеси, т.

Для определения температур изменения фазового состояния железосодержащих материалов использованы модели «состав-свойства», разработанные в ИЧМ, и позволяющие по исходному химическому составу прогнозировать восстановимость материалов, температуры потери газопроницаемости слоя железорудных материалов, начала фильтрации жидких фаз, количество и состав первичных, промежуточных и «зависших» в слое кокса шлаковых и металлоуглеродистых расплавов.

Для прогнозирования высокотемпературных свойств железорудных материалов использованы следующие аналитические зависимости, полученные на основе анализа экспериментальных данных о температурах размягчения и плавления различных видов агломерата, окатышей и железной руды при восстановительно-тепловой обработке [20].

Температура начала размягчения при восстановимости  $R=0$ :

$$T_{np}^0 = 950,4 + 0,0802Fe_2O_3 - 2,5026FeO + 10,747\Delta e + 329,6238\rho. \quad (2)$$

Температура плавления при  $R=0$ :

$$T_p^0 = 1653,7 - 0,284Fe_2O_3 - 4,6211FeO - 1,0833\Delta e - 186,6902\rho. \quad (3)$$

Поскольку закономерности изменения температур размягчения и плавления от степени восстановления для агломерата, окатышей и руды существенно отличаются, уравнения для определения значений соответствующих температур при восстановительно-тепловой обработке получены для каждого компонента шихты отдельно.

Температура начала размягчения:

для агломерата и конвертерного шлака

$$T_{np}^R = T_{np}^0 \cdot (1 - 3,02832 \cdot 10^{-3} \cdot R + 2,58482 \cdot 10^{-5} \cdot R^2); \quad (4)$$

для окатышей

$$T_{np}^R = T_{np}^0 \cdot (1 - 6,1806 \cdot 10^{-3} \cdot R + 4,55705 \cdot 10^{-5} \cdot R^2); \quad (5)$$

для руды

$$T_{np}^R = T_{np}^0 \cdot (1 - 5,33764 \cdot 10^{-3} \cdot R + 4,30821 \cdot 10^{-5} \cdot R^2), \quad (6)$$

где  $R$  – степень восстановления.

Температура плавления:

для агломератов и конвертерного шлака

$$T_p^R = T_p^0 \cdot (1 - 14,9552 \cdot 10^{-3} \cdot R + 5,82338 \cdot 10^{-4} \cdot R^2 - 7,60772 \cdot 10^{-6} \cdot R^3 + 3,3172 \cdot 10^{-8} \cdot R^4); \quad (7)$$

для окатышей

$$T_p^R = T_p^0 \cdot (1 - 6,76358 \cdot 10^{-3} \cdot R + 1,77133 \cdot 10^{-4} \cdot R^2 - 1,10731 \cdot 10^{-6} \cdot R^3); \quad (8)$$

для руды

$$T_p^R = T_p^0 \cdot (1 - 20,8597 \cdot 10^{-3} \cdot R + 5,05642 \cdot 10^{-4} \cdot R^2 - 3,02042 \cdot 10^{-6} \cdot R^3). \quad (9)$$

Положение в объеме печи линии начала размягчения определяется распределением железосодержащих компонентов и, соответственно, распределением температур изменения их фазового состояния. В свою очередь, верхняя граница пластичной зоны может быть определена, как кривая, соединяющая точки, соответствующие температурам начала размягчения материалов в рабочем пространстве печи. Для определения положения точек этой линии разработан специальный алгоритм, основанный на предложенном способе определения параметров температурного поля в объеме доменной печи с использованием масштабного коэффициента распределения температур в объеме печи.

При определении масштабного коэффициента принимается допущение о линейном распределении температур по высоте шахты печи. Значение масштабного коэффициента рассчитывается, как отношение разности температуры плавления железосодержащих материалов в соответствующей зоне печи и температуры на уровне засыпи шихты к разности их вертикальных координат. Масштабный коэффициент вычисляется по формуле:

$$k = \frac{T_p - T_i}{S_{пл}^i - h_i}, \quad (10)$$

где  $T_p$  – температура плавления, °С;  $T_i$  – температура в  $i$ -й точке на поверхности засыпи, °С;  $S_{пл}^i$  – вертикальная координата  $i$ -й точки на линии плавления, м;  $h_i$  – вертикальная координата  $i$ -й точки на поверхности засыпи, м.

Температуры начала размягчения смесей железосодержащих компонентов, формирующихся в процессе загрузки в различных зонах печи, могут быть определены в соответствии с компонентным составом смесей при помощи выражения:

$$T_{нр см} = \frac{\sum_j T_{нр}^j \cdot M^j}{\sum_j M^j}, \quad (11)$$

где  $T_{нр}^j$  – температура начала размягчения  $j$ -го компонента смеси, °С;  $M^j$  – масса  $j$ -го компонента в смеси, т.

Расчитанные в контролируемых зонах сечения печи температуры размягчения железосодержащих материалов и их распределение в объеме печи, полученное с помощью коэффициента масштабирования, позволяют определить размеры и положение линии размягчения.

Разность координат, определяющих положение линий плавления и размягчения в контролируемых зонах печи, характеризует толщину ПЗ, которая может быть определена по формуле:

$$\Delta H_{пл}^i = \frac{T_p - T_{нр}}{k}, \quad (12)$$

где  $\Delta H_{пл}^i$  – толщина ПЗ в  $i$ -й точке, м;  $T_{нр}$  – температура начала размягчения, °С;  $k$  – масштабный коэффициент, °С/м.

Как известно, производительность печи пропорциональна площади поверхности плавления

ПЗ, которая определяется суммой площадей, образованных в результате пересечения линии плавления железосодержащими слоями шихтовых материалов. Исходная структура слоев шихтовых материалов на уровне колошника доменной печи может быть определена с использованием профилемера или комплексной математической модели распределения шихтовых материалов. Для определения параметров слоев шихтовых материалов на уровне ПЗ используется математическая модель движения шихтовых материалов в шахте.

Площадь поверхности плавления железосодержащих материалов может быть условно определена, как суммарная площадь поверхностей вращения отрезков линии плавления в слоях железорудных материалов:

$$A_{эфф} = \sum_{i=1}^N \pi \cdot l_i \cdot (R_i^B + R_i^H), \quad (13)$$

где  $N$  – число слоев железосодержащих материалов, образующих линию плавления;  $l_i$  – длина отрезка (образующей) линии плавления в  $i$ -м слое железосодержащих материалов, м;  $R_i^B$  – радиальная координата точки пересечения верхней границы  $i$ -го слоя железосодержащих материалов с линией плавления, м;  $R_i^H$  – радиальная координата точки пересечения нижней границы  $i$ -го слоя железосодержащих материалов с линией плавления, м.

Основываясь на известных представлениях о параметрах, определяющих форму и положение ПЗ в ДП, а также результатах корреляционного анализа связей этих параметров с технологическими показателями плавки, составлены комплексы, являющиеся аргументами критерия оценки ПЗ.

Первый аргумент критерия представляет собой сумму отношений толщин ПЗ в контролируемых сечениях печи и отношения максимальной из четырех значений толщины в этих зонах к минимальному ее значению. Представленный таким образом аргумент характеризует особенности конфигурации ПЗ, образуемой линиями размягчения и плавления. Аргумент может быть представлен выражением:

$$x_1 = \frac{\Delta H_{cz}^{I}}{\Delta H_{cz}^{2\Pi}} + \frac{\Delta H_{cz}^{\Pi\Phi}}{\Delta H_{cz}^{I\Pi}} + \frac{\max(\Delta H_{cz}^{I}, \Delta H_{cz}^{2\Pi}, \Delta H_{cz}^{I\Pi}, \Delta H_{cz}^{\Pi\Phi})}{\min(\Delta H_{cz}^{I}, \Delta H_{cz}^{2\Pi}, \Delta H_{cz}^{I\Pi}, \Delta H_{cz}^{\Pi\Phi})}, \quad (14)$$

где  $\Delta H_{cz}^{пф}$ ,  $\Delta H_{cz}^{пп}$ ,  $\Delta H_{cz}^{2п}$ ,  $\Delta H_{cz}^{ц}$  – толщина ПЗ в контролируемых профиломером зонах печи, соответственно, в периферийной, первой и второй промежуточных, центральной, м.

Второй аргумент критерия характеризует относительное положение корня ПЗ и может быть представлен следующим выражением:

$$x_2 = \frac{1}{\max(S_{ц}, S_{пп}, S_{2п}, S_{пф}) - S_{пф} + 1} \times (\max(S_{ц}, S_{пп}, S_{2п}, S_{пф}) - \min(S_{ц}, S_{пп}, S_{2п}, S_{пф})), \quad (15)$$

где  $S_{пф}$ ,  $S_{пп}$ ,  $S_{2п}$ ,  $S_{ц}$  – расстояния от оси воздушных фурм до линии плавления в периферийной, первой и второй промежуточных, центральной зонах печи, соответственно, м.

Числитель выражения второго аргумента критерия определяет максимальную разность координат точек линии плавления и характеризует ее «вытянутость» в вертикальном направлении. Знаменатель – разность между верхней точкой линии плавления и контролируемой координатой линии плавления в периферийной зоне, что характеризует относительное положение корня ПЗ. С целью исключения обращения знаменателя в ноль он содержит «+1». Чем ближе форма зоны к U-образной, тем ближе значение  $x_2$  к числителю. Если ПЗ приобретает Л-образную форму аргумент  $x_2$  изменяется в пределах от 0 до 1 (чем больше «вытянутость» зоны, тем ближе значение  $x_2$  к 1).

Как показывает анализ корреляционных связей, наиболее тесно связаны с производством два аргумента, составленные из параметров ПЗ. Коэффициенты корреляции этих комплексных аргументов имеют большие значения по сравнению с корреляцией каждого из параметров с производством.

Третий аргумент критерия – эффективная площадь поверхности плавления:

$$x_3 = A_{эфф}. \quad (16)$$

Разработка критерия осуществлялась в соответствии с методикой, представленной в публикациях авторов статьи [21]. Следует учесть, что при выполнении процедуры нормирования и приведения аргументов к нормальному закону

распределения  $\left( X_i = \frac{x_i - m_{x_i}}{3 \cdot \sigma_{x_i}} \right)$ ,  $m_x$  и  $\sigma_x$  расчи-

тываются на основе анализа данных базового периода, то есть, для условий рациональной по форме и положению ПЗ.

В результате последующего логит-преобразования каждого аргумента  $x_{1...3}$  критерий оценки ПЗ примет вид:

$$K_{cz} = (F(x_1) \cdot F(x_2) \cdot F(x_3))^{\frac{1}{3}}. \quad (17)$$

Подтвердить достоверность оценки ПЗ в ДП с помощью предложенного критерия возможно путем анализа и установления его связей с основными технологическими параметрами процесса, что представляется возможным благодаря отсутствию в выражении критерия технологических параметров. Для анализа влияния формы и положения ПЗ на технологические параметры и показатели доменной плавки использован многомерный сравнительный анализ. Для построения модели оптимальной структуры применена методика факторного анализа [22]. Результаты факторного анализа показали наличие тесной связи основных параметров пластичной зоны с технологическими параметрами, что может служить подтверждением достоверности определения положения ПЗ в ДП с помощью ранее разработанного и усовершенствованного метода.

### Выводы

Предложенный критерий позволяет осуществлять текущий контроль конфигурации и положения формируемой в доменной печи пластичной зоны. Сопоставление значений критерия с оптимальными, полученными для условий базового периода работы печи, может быть использовано для разработки и выбора управляющих воздействий на процесс доменной плавки. Предложенный подход к разработке критерия оценки формы и положения пластичной зоны в доменной печи имеет перспективы развития по мере совершенствования методов и средств контроля процессов плавки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Модельные* опыты исследования газопроницаемости в доменной печи при вдувании больших количеств угольной пыли / Х.В. Гуденау, К. Крайбих, К.Х. Петерс и др. // Черные металлы. – 1988. – № 19. – С.10-19.
2. *Оценка* формы зоны вязкопластичных масс железорудных материалов в доменной печи методом математического моделирования / О.П. Онорин, Н.А. Спириин, В.В. Лав-

ров, И.Е. Косаченко, В.Ю. Рыболовлев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2013. – № 6. – С.24-29.

3. *Литунев С.А.* Газопроницаемость кокса в нижней части доменной печи как фактор, определяющий конфигурацию зоны когезии // Университетская наука. Металлургический факультет. – 2013. – С.49-50.

4. *A numerical study on the softening process of iron ore particles in the cohesive zone of an experimental blast furnace using a coupled CFD-DEM method / M. Baniasadi, M. Baniasadi, G. Pozzetti, B Peters.* – [Электронный ресурс]: ArXiv. – 2018. – С.1-45. Режим доступа <https://arxiv.org/pdf/1806.08114.pdf>

5. *Gas Permeability in Cohesive Zone in the Ironmaking Blast Furnace / J. Ishii, R. Murai, I. Sumi, Y. Yongxiang, R. Boom.* – 2017. – Volume 57. – Issue 9. – P.1531-1536. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-224>

6. *Lu Y., Jiang Z., Zhang X., Wang J., Zhang X.* [Электронный ресурс]: Vertical Section Observation of the Solid Flow in a Blast Furnace with a Cutting Method. *Metals – Open Access Metallurgy Journal.* – 2019. – vol.9. – № 2. – P.127. <https://doi.org/10.3390/met9020127>

7. *Исследование* газопроницаемости доменной шихты при различном расположении слоев компонентов / В.П. Русских, В.В. Семаков, Д.И. Гаврилоглу, М.А. Подгорный, И.И. Харченко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2015. – С.13-16.

8. *Гуденау Х.В., Крайбих К., Петерс К.Х.* Оптимизация профиля пластичной зоны доменной печи // Черные металлы. – 1981. – № 3. – С.13-18.

9. *Петерс К.Х., Пот Г., Петерс М.* Исследование причин нарушения газопроницаемости в доменной печи. // Черные металлы. – 1986. – № 22. – С.10-20.

10. *Повышение* производительности доменных печей / В. Хартиг, К. Лангнер, Г.Б. Люнгер и др. // Черные металлы. – 1996. – № 12. – С.17-25.

11. *Экспериментальная* оценка влияния режима загрузки на формирование пластичной зоны доменной печи / Н.А. Егоров и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1984. – № 12. – С.25-26.

12. *Influence of Shape of Cohesive Zone on Gas Flow and Permeability in the Blast Furnace Analyzed by DEM-CFD Model / [Shigeru UEDA et al.] // ISIJ International.* – Vol.55 (2015). – № 6. – P.1232-1236. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.55.1232>

13. *Gas-powder* flow in blast furnace with different shapes of cohesive zone X.F. Dong et al. // *Applied Mathematical Modelling.* – 2006. – № 30. – P.1293-1309. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2006.03.004>

14. *Разработка* моделирующей системы расчета теплообменных процессов и оценки параметров зоны вязкопластичного состояния железорудных материалов в доменной печи / В.В. Лавров и др. // Известия ВУЗов «Черная металлургия». – 2013. – № 4. – С.34-37.

15. *Dong Fu, Yan Chen.* Prediction of the cohesive zone / *AISTech Proceedings.* – 2011. – Vol. 1. – P.695-708.

16. *New approach for the determination of the blast furnace cohesive zone: Final report / D. Sert, G. Danloy, O. Havelange, J. Saiz de Ayala.* – [Электронный ресурс]: ECSC, ISBN 92-894-7491, Luxembourg. – 2004. Режим доступа <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/48fa9927-4eb9-4f37-bb07-4c7621fb58f3>

17. *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.

18. *Интеллектуальная* система поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой / Муравьева И.Г., Тогобицкая Д.Н., Семенов Ю.С. и др. // Компьютерные моделирования: анализ, управление, оптимизация. – 2017. – №1 (1). – С.25-30. Режим доступа <http://kmauo.org/wp-content/uploads/2017/09/Muravyova.pdf>. DOI выпуска: <https://doi.org/10.32434/2521-6406-2017-1-1>

19. *Complex Mathematical Model of the Distribution of Multicomponent Charge in a Blast Furnace / N.G. Ivancha, I.G. Murav'eva, E.I. Shumel'chik, V.I. Vishnyakov, Yu.S. Semenov.* – *Metallurgist.* – May 2018, Volume 62. – Issue 1-2. – P.95-100. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0630-1>

20. *Прогнозирование* физико-химических свойств оксидных систем / Э.В. Приходько, Д.Н. Тогобицкая, А.Ф. Хамхотько, Д.А. Степаненко. – Днепропетровск: Пороги, 2013. – 344 с.

21. *Создание* интеллектуальных систем поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой. Новые подходы / И.Г. Муравьева, Д.Н. Тогобицкая, Ю.С. Семенов, Н.Г. Иванча, А.И. Белькова, Е.И. Шумельчик, Д.А. Степаненко. – К.: Наукова думка, 2019. – 272 с.

22. *Иберла К.* Факторный анализ. / Пер. с нем. В.М. Ивановой. – М.: Статистика, 1980. – 399 с.

Поступила в редакцию 25.09.2019

**КРИТЕРІЙ ОЦІНЮВАННЯ ФОРМИ ТА ПОЛОЖЕННЯ ПЛАСТИЧНОЇ ЗОНИ У ДОМЕННІЙ ПЕЧІ**

*Муравйова І.Г., Білошапка О.О., Іванча М.Г., Белькова А.І., Вишняков В.І., Ляшенко О.А.*

В роботі надана методика розробки критерію оцінювання форми та положення пластичної зони у доменній печі у рамках створеної в Інституті чорної металургії інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень з управління доменною плавкою. У якості аргументів розробленого критерію прийняті параметри, які безпосередньо відображують форму, товщину та положення пластичної зони у робочому просторі доменної печі. Запропонована методика визначення основних параметрів пластичної зони. Основним постулатом методу визначення пластичної зони є положення, згідно з яким контури зон розм'якшення та плавлення визначаються лініями, які з'єднують точки, відповідні температурам початку розм'якшення та плавлення залізистих матеріалів, які знаходяться у різних зонах робочого простору доменної печі. Показано, що засновуючись на встановленому за допомогою розробленого раніше методу положення лінії плавлення, розподілу компонентів шихти по перерізу колошника, яке визначається з використанням комплексної моделі, синтезованої з моделей завантаження – вивантаження матеріалів з бункера безконусного завантажувального пристрою (БЗП) та моделі радіального розподілу матеріалів на колошнику печі, а також значенні температур плавлення різних сумішей компонентів залізородної частини шихти, які утворюються при вивантаженні їх на колошник, розрахованих за допомогою статистичних моделей, визначається розподіл температур плавлення залізистих матеріалів в об'ємі печі. Наведені аналітичні залежності, отримані на основі аналізу експериментальних даних про температури розм'якшення та плавлення різних видів агломерату, окатишів і залізної руди при відновно-тепловому обробленні, які можуть бути використані для прогнозування високотемпературних властивостей залізородних матеріалів. Для визначення положення точок лінії розм'якшення розроблено спеціальний алгоритм, який засновано на запропонованому способі визначення параметрів температурного поля в об'ємі доменної печі з використанням масштабного коефіцієнта розподілу температур в об'ємі печі. Використання критерію дозволить оцінювати параметри пластичної зони у доменній печі та обґрунтувати вибір оптимальних управляючих впливів на процес доменної плавки.

**Ключові слова:** доменна піч, пластична зона, оптимізація, критерій, хід печі, площа поверхні плавлення.

**CRITERION FOR ASSESSMENT OF SHAPE AND POSITION OF THE COHESIVE ZONE IN A BLAST FURNACE**

*Muravyeva I.G.<sup>a</sup>, Beloshapka E.A.<sup>a</sup>, Ivancha N.G.<sup>a</sup>, Belkova A.I.<sup>a</sup>, Vishnyakov V.I.<sup>a</sup>, Liashenko O.A.<sup>b</sup>*

<sup>a</sup> Z.I. Nekrasov Iron & Steel Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

<sup>b</sup> Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

The paper presents a methodology for developing a criterion for assessing the shape and position of a plastic zone in a blast furnace within the framework of an intelligent decision support system for blast smelting control created at the National Iron and Steel Institute, Ukraine. As arguments for developed criterion, the parameters directly reflecting the shape, thickness and position of plastic zone in a working space of a blast furnace are taken. A method for determining the basic parameters of a cohesive zone is proposed. Basic premise of the method of determining the thickness of a cohesive zone is provision that contours of softening and melting zones are defined by lines connecting the points corresponding to the temperatures of beginning of melting and softening of ferrous materials in different zones of blast furnace workspace. It is shown that based on the position of a melting line established by the method developed earlier, the distribution of components of the charge over the cross-section of a furnace top, which is determined using the complex model synthesized from the models for loading and unloading of materials from the bunker of coneless loading device and the model of radial distribution of materials on furnace top, as well as the melting temperature of various mixtures of the components of iron part of charge formed during unloading them on the top of a furnace, calculated using statistical models, determines the distribution of the melting points of iron-containing materials in the furnace volume. The paper presents analytical dependences obtained on the basis of the analysis of experimental data on the softening and melting temperatures of various types of sinter, pellets and iron ore during reduction-heat treatment, which can be used to predict the high-temperature properties of iron ore materials. To determine the position of the points of the softening line, a special algorithm was developed based on the proposed method for determining the parameters of the temperature field in the volume of the blast furnace using the scaling coefficient for temperature distribution in the furnace volume. Application of the criterion allows to evaluate the parameters of plastic zone in the blast furnace and support the choice of the optimal control action on the process of blast furnace.

**Keywords:** blast furnace, cohesive zone, optimization, criterion, furnace progress, melting surface area.

## REFERENCES

1. Gudenu Kh.V. i dr. *Model'nye opyty issledovaniya gazopronitsaemosti v domЕННОй pechi pri vduvaniі bol'shikh količestv ugol'noi pyli* [Model experiments in the study of gas permeability in a blast furnace when blowing large quantities of coal dust]. *Chernye metally* [Ferrous metals]. 1988, no. 19, pp.10-19. (in Russian).
2. Onorin O.P., Spirin N.A., Lavrov V.V., Kosachenko I.E., Rybolovlev V.Yu. *Ocenka formy zony vyazkoplastichnykh mass zhelezorudnykh materialov v domЕННОй pechi metodom matematicheskogo modelirovaniya* [Evaluation of the shape of the zone of viscoplastic masses of iron ore materials in a blast furnace by mathematical modeling]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. 2013, no. 6, pp.24-29. (in Russian).
3. Lipunov S.A. *Gazopronitsaemost koksa v nizhnej chasti domЕННОй pechi kak faktor, opredelyayushij konfiguratsiyu zony kogezi* [Coke gas permeability in the lower part of a blast furnace as a factor determining the cohesion zone configuration]. *Universitetskaya nauka* [University science], 2013, Metallurgicheskii fakultet, pp.49-50. (in Russian).
4. *A numerical study on the softening process of iron ore particles in the cohesive zone of an experimental blast furnace using a coupled CFD-DEM method* [Electronic resource]. M. Baniyadi, M. Baniyadi, G. Pozzetti, B. Peters. Access mode <https://arxiv.org/pdf/1806.08114.pdf>
5. Gas Permeability in Cohesive Zone in the Ironmaking Blast Furnace J. Ishii, R. Murai, I. Sumi, Y. Yongxiang, R. Boom. 2017, vol. 57, Issue 9-5, pp.1531-1536. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-224>
6. Lu Y., Jiang Z., Zhang X., Wang J. and Zhang X. Vertical Section Observation of the Solid Flow in a Blast Furnace with a Cutting Method. [Electronic resource]. <https://www.mdpi.com/2075-4701/9/2/127/pdfhttps://doi.org/10.3390/met9020127>
7. Russkikh V.P., Semakov V.V., Gavriloglu D.I., Podgorny M.A., Kharchenko I.I. *Issledovaniye gazopronitsayemosti domЕННОй shikhty pri razlichnom raspolozhenii sloev komponentov* [The study of the gas permeability of the blast furnace charge at a different arrangement of component layers]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost* [Metallurgical and Mining Industry], 2015, pp.13-16. (in Russian).
8. Gudenu Kh.V., Kraibikh K., Peters K.Kh. *Optimizatsiya profilya plastichnoi zony domЕННОй pechi* [Optimization of the cohesive zone profile of the blast furnace]. *Chernye metally* [Ferrous metals], 1981, no. 3, pp.13-18. (in Russian).
9. Peters K.Kh., Pot G., Peters M. *Issledovanie prichin narusheniya gazopronitsaemosti v domЕННОй pechi* [Research the causes of violations of the gas permeability in the blast furnace]. *Chernye metally* [Ferrous metals], 1986, no. 22, pp.10-20. (in Russian).
10. Khartig V. i dr. *Povyshenie proizvoditel'nosti domennykh pechei* [Increasing the productivity of blast furnaces]. *Chernye metally* [Ferrous metals], 1996, no. 12, pp.17-25. (in Russian).
11. Egorov N.A. i dr. *Eksperimental'naya otsenka vliyaniya rezhima zagruzki na formirovanie plastichnoi zony domЕННОй pechi* [Experimental evaluation of impact loading mode for forming plastic blast furnace zone]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 1984, no. 12, pp.25-26. (in Russian).
12. Influence of Shape of Cohesive Zone on Gas Flow and Permeability in the Blast Furnace Analyzed by DEM-CFD Model, [Shigeru UEDA et al.], ISIJ International, vol. 55 (2015), no. 6, pp.1232-1236. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.55.1232>
13. Dong X.F. et al. Gas-powder flow in blast furnace with different shapes of cohesive zone. *Applied Mathematical Modeling*, 2006, no. 30, pp.1293-1309. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2006.03.004>
14. Lavrov V.V. et al. *Razrabotka modeliruyushchei sistemy rascheta teploobmennyykh protsessov i otsenki parametrov zony vyazkoplastichnogo sostoyaniya zhelezorudnykh materialov v domЕННОй pechi* [Development of modeling system for heat transfer processes calculation and assessment of parameters for viscoplastic state iron material in the blast zone of the furnace]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2013, no. 4, pp.34-37. (in Russian).
15. Dong Fu, Yan Chen. Prediction of the cohesive zone. *AISTech Proceedings*, 2011, vol. 1, pp.695-708.
16. *New approach for the determination of the blast furnace cohesive zone*. [Electronic resource] Final report, Access mode <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/48fa9927-4eb9-4f37-bb07-4c7621fb58f3>
17. Bol'shakov V.I., Murav'eva I.G., Semenov Yu.S. *Primeneniye radiolokatsionnykh sistem izmereniya poverkhnosti zasypki shikhty dlya kontrolya i upravleniya domЕННОй plavkoi* [The use of radar systems for measuring the surface of the charge sheet to monitor and control blast furnace smelting], Dnepropetrovsk, Porogi, 2013, 364 p. (in Russian).
18. Murav'eva I.G., Togobitskaya D.N., Semenov Iu.S., Shumelchik E.I., Bel'kova A.I., Beloshapka E.A. *Intellektual'naya sistema podderzhki prinyatiya resheniy po upravleniyu domЕННОй plavkoy* [Intelligent decision support system management of blast furnace smelting]. *Komp'yuternye modelivannā: analiz, upravlinnā, optimizatsiā* [Computer Modeling: Analysis, Control, Optimization]. 2017, no. 1 (1), pp.25-30. Access mode <http://kmauo.org/wp-content/uploads/2017/09/Muravyova.pdf>. DOI issue: <https://doi.org/10.32434/2521-6406-2017-1-1> (in Russian).
19. Ivancha G.N., Murav'eva I.G., Shumel'chik E.I., Vishnyakov V.I., Semenov Yu.S. Complex Mathematical Model of the Distribution of Multicomponent Charge in a Blast Furnace, *Metallurgist*, May 2018, vol.62, Issue 1-2, pp.95-100. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0630-1>
20. Prikhod'ko E.V., Togobitskaya D.N., Khamkhot'ko A.F., Stepanenko D.A. *Prognozirovanie fiziko-khimicheskikh svoystv oksidnykh sistem* [Prediction of the physicochemical properties of oxide systems]. Dnepropetrovsk, Porogi, 2013, 344 p. (in Russian).
21. Murav'eva I.G., Togobitskaya D.N., Semenov Yu.S., Ivancha N.G., Belkova A.I., Shumelchik Ye.I., Stepanenko D.A. *Sozdaniye intellektualnykh sistem podderzhki prinyatiya resheniy po upravleniyu domЕННОй plavkoy. Novyye podkhody* [Creation of intelligent decision support systems for blast furnace management. New approaches]. Kyiv, Naukova dumka, 2019, 272 p. (in Russian).
22. Iberla K. *Faktorniy analiz*. [Factor analysis], Trans. from Ger. by V.M. Ivanova, Moskva, Statistika, 1980, 399 p. (in Russian).