

DOI 10.23859/1994-0637-2018-6-87-1
УДК 66-97

© Лаврухин А. И., Селяничев О. Л., 2018

Лаврухин Андрей Игоревич

Аспирант,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: wendigoxs@gmail.com

Lavrukhin Andrey Igorevich

Post-graduate student,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: wendigoxs@gmail.com

Селяничев Олег Леонидович

Кандидат технических наук, доцент,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: selo@chsu.ru

Selyanichev Oleg Leonidovich

PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: selo@chsu.ru

**АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРЫ
ПОВЕРХНОСТИ ЗАСЫПИ ШИХТЫ
КАК ЭЛЕМЕНТ СИСТЕМЫ
ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ
РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ
ДОМЕННОЙ ПЕЧЬЮ**

**ANALYSIS OF TEMPERATURE ON
THE SURFACE OF CHARGED RAW
MATERIALS AS COMPONENT OF
THE DECISION SUPPORT SYSTEM
FOR BLAST FURNACE
MANAGEMENT**

Аннотация. Для обеспечения качественной работы доменной печи необходимо контролировать виды рудных выгрузок, вес и распределение порций сырьевых материалов. Адаптированное применение геометрической модели тепловизионного изображения поверхности засыпи доменной печи к измерениям уровня засыпи шихты позволяет повысить точность сопоставления термограмм траекториям загрузки материалов. Выданные системой рекомендации для принятия решений по типу корректировки, траектории загрузочного устройства и весу порции позволяют персоналу оперативно реагировать и поддерживать работу печи в оптимальном режиме.

Abstract. To ensure the quality of the blast furnace, it is necessary to control types of ore discharge, weight and distribution of portions of raw materials. Adapted application of the geometrical model thermovisional image of raw materials' surface charged into the blast furnace to measurements of the charge level makes it possible to improve the accuracy of mapping thermal images to material loading trajectories. Decision support system helps the to determine type of adjustment, the trajectory of the loading device and the weight of the portion, thus, the staff react promptly and to maintain the furnace in optimal mode.

Ключевые слова: доменная печь, домна, тепловизионное изображение, поверхность шихты, система поддержки принятия решений

Keywords: blast furnace, thermal imaging, gas breakthrough, surface of charged raw materials, decision support system

Введение

Черная металлургия является важной отраслью промышленности страны, и для ускорения ее экономического роста остается высокой потребность в разнообразных мероприятиях, направленных на совершенствование производства, его оптимизацию, экономию сырья и энергоресурсов.

Для обеспечения качественной и бесперебойной работы доменной печи необходимо контролировать и управлять большим числом параметров, среди которых: регулярность и виды рудных выгрузок, вес и распределение порций сырьевых материалов, а также воздействие случайных факторов – различные отклонения от нормальной работы, человеческий фактор и проч.

Один из интенсивно развивающихся в настоящее время методов управления параметрами печи – тепловизионный метод неразрушающего контроля и диагностики – позволяет с помощью тепловизоров регистрировать распределение температуры по поверхности засыпи шихты и отображать тепловые характеристики шихты в виде псевдоцветных изображений – термограмм. Анализ термограмм позволяет компенсировать аномальные режимы плавки доменной печи, вносить коррективы в процесс загрузки новых порций шихты – изменять объем, состав, распределение по поверхности.

Основная часть

В управлении процессом плавки доменной печи выделяют виды контроля и управления: «снизу» – контроль режима горна печи, включая параметры количества, давления, температуры и состава комбинированного дутья, его влажности, повышенного давления на колошнике, диаметра и высова фурм, величины общего перепада статического давления газа в шахте; «сверху» – контроль распределения материалов на колошнике, режима загрузки – уровня и состава засыпи, системы загрузки и величины подачи, а также схемы работы вращающегося распределителя шихты, температуры поверхности колошника и отходящих газов. Регулирование «снизу» обычно осуществляется для поддержания стабильно максимальной температуры дутья. Наиболее оптимальным управлением в широких пределах является регулирование «сверху», поскольку оно призвано поддерживать постоянным режим печи снизу и подвергать процесс изменениям только в особых случаях.

Для доменных печей большого объема эффективным режимом загрузки шихты является выгрузка в осевую зону печи [1]. В рамках контроля процессов загрузки материалов и выплавки чугуна в целом домны оснащают широким спектром измерительного оборудования. Известные способы контроля температуры поверхности засыпи шихты доменной печи основываются на применении:

- термобалок – температура измеряется на небольшом расстоянии от поверхности вдоль линии диаметра; термобалки устанавливаются вдоль одного, реже – двух диаметров печи – таким образом, что узкие зоны измерения не могут быть подвинуты в каком-либо направлении в процессе работы печи;
- спиротерм [2] – измерение температуры пошагово от центра к периферии и обратно; для спиротерм характерно медленное пошаговое получение температуры в нескольких точках по спирали от центра к периферии и обратно;

– акустических пирометров [6]; измерение с помощью акустических пирометров основывается на изменении плотности газовой среды под колошником, что в целом дает более точную картину, чем анализ температуры приколошниковых газов, однако разрешение остается низким.

Получение температурной картины поверхности засыпи шихты с помощью тепловизора лишено данных недостатков: высокое разрешение и частота порядка нескольких герц позволяют получать в режиме реального времени абсолютное значение температуры на поверхности шихты с высокой точностью. Таким методом контроля могут быть выявлены прорывы газового потока и аналогичные периферические отклонения от оптимального хода доменной печи. Для выбора и обоснования программ оптимальной загрузки необходимо знать закономерности распределения шихтовых материалов, газопроницаемости и степень их влияния на ход процессов плавки. В работе [3] показано, что для этого нужна информация о распределении рудных нагрузок, скоростей схода шихты и газопроницаемости по радиусу и окружности колошника; температуре поверхности засыпи и периферии колошника; степени использования восстановительной способности оксида углерода и водорода. Применение бесконусных загрузочных устройств (БЗУ) позволило существенно расширить возможности управления радиальным и окружным распределением шихтовых материалов.

Нормальный технологический режим работы доменной печи должен обеспечить бесперебойный интенсивный, но в то же время ровный ее ход для получения наиболее высоких показателей по производству чугуна, удовлетворяющего требованиям ГОСТ 805-95 для передельного чугуна, ГОСТ 4832-95 для литейного и внутризаводских технических условий при минимальном расходе кокса и сырых материалов. Признаками устойчивого ровного хода доменной печи являются: непрерывный плавный сход шихтовых материалов, устойчивый характер распределения потока газа в печи. Это может быть установлено по температуре на поверхности засыпи материалов.

Центрально под куполом доменной печи располагается загрузочное устройство, а значит, конструктивно тепловизор должен располагаться в свободной части купола печи под углом к вертикали, тогда на термограммах будут присутствовать пространственные искажения. Предложенная в [4] геометрическая модель тепловизионного изображения поверхности засыпи шихты доменной печи, основанная на внутреннем ориентировании одиночных термографических изображений [5], позволяет рассчитать таблицу соответствия пикселей на термографическом изображении точкам на поверхности засыпи шихты. Профиль уровня засыпи может значительно изменяться от одной печи к другой, а также зависеть от программы загрузки и общего хода печи – ровный или с перекосами. Характерный вид профиля уровня засыпи представлен на рис. 1.

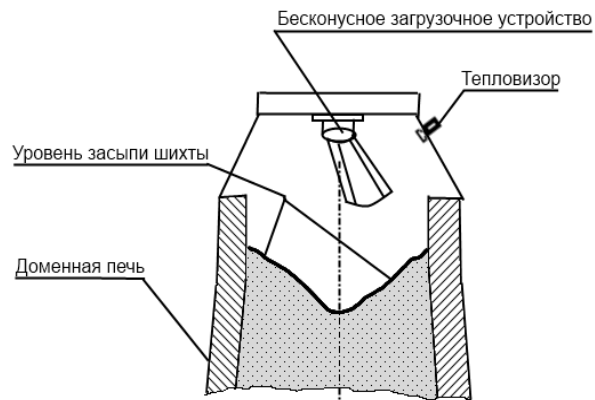


Рис. 1. Профиль засыпи шихты доменной печи

На практике уровень засыпи может быть измерен в нескольких точках с помощью механических зондов или по всей поверхности засыпи в виде сетки значений (рис. 2) в зависимости от способа измерения. При измерении зондами для расчетов геометрической модели принимается среднее значение уровня засыпи, что в целом дает хорошие результаты. Однако наличие множественных измерений может повысить чувствительность модели в режимах перекоса по уровню загрузки.

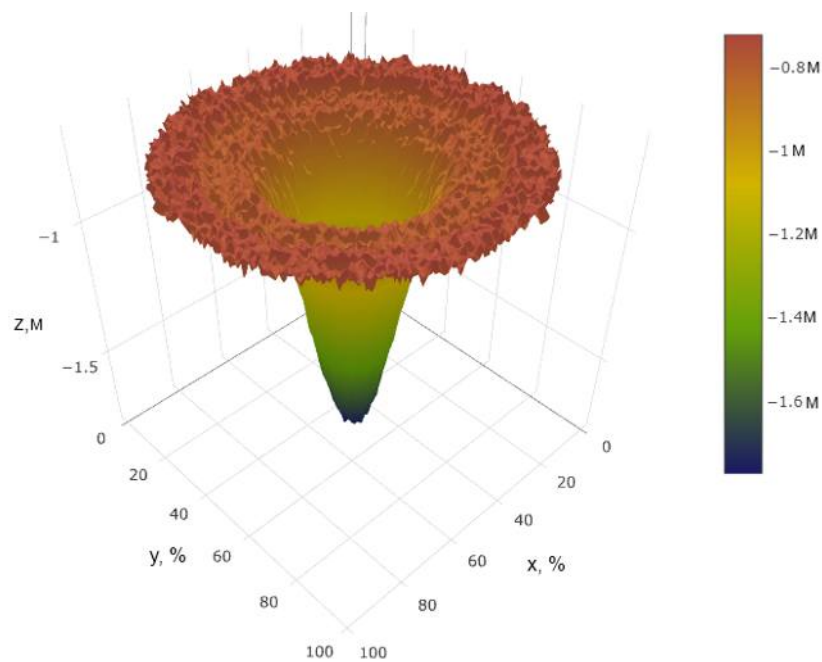


Рис. 2. Представление сетки измерений уровня засыпи

При наличии сетки значений уровня модель тепловизионного изображения может быть использована для повышения точности сопоставления термограмм реальным объектам в доменной печи. Набор измерений может быть произвольным. Алгоритм состоит из нескольких шагов. На первом шаге необходимо упорядочить сетку по неубыванию координат относительно выбранных осей, например, оси могут быть направлены на непротиволежащие летки печи. В процессе расчета модели выполняется трассировка лучей для нахождения пересечения с плоскостью, поэтому далее необходимо провести разбиение сетки на непересекающиеся треугольники. Пусть имеется упорядоченная по неубыванию координат таблица измерений уровня засыпи шихты, состоящая из n строк ($i = 0 \dots n$) и m ($j = 0 \dots m$) столбцов. Составить треугольники из таблицы можно способом: для каждой ячейки таблицы с четными координатами может быть построено два треугольника: ABC и CBD с координатами вершин в таблице $A(i, 2j)$, $B(i, 2j + 1)$, $C(i + 1, 2j)$, $D(i + 1, 2j + 1)$. Далее необходимо последовательно применить вычисления геометрической модели тепловизионного изображения поверхности засыпи шихты [4] к каждому треугольнику с дополнительным условием: точки вне треугольника исключаются из расчетов. Результатом расчета модели является матрица соответствия пикселей на тепловизионном изображении точкам на поверхности засыпи шихты. Применяя таким образом расчеты к k треугольникам, получим k не полностью заполненных матриц. Результирующая матрица может быть получена как поэлементное среднее:

$$m_{i,j} = \frac{\sum_n M_{n,i,j}}{\sum_n \begin{cases} 1, M_{n,i,j} \neq null \\ 0 \end{cases}},$$

где $n = 0 \dots k$, $m_{i,j}$ – элемент результирующей матрицы, $M_{n,i,j}$ – элемент в i -строке j -столбце исходной матрицы M_n .

Это позволяет повысить точность определения разной степени нагретых зон на термограммах с учетом многоточечных измерений уровня засыпи шихты как в условиях ровного хода, так и в аномальных ситуациях.

Влияние многочисленных изменяющихся факторов затрудняет поддержание рационального распределения материалов в течение длительного времени, поэтому необходимо периодическое регулирование хода печи изменением параметров режима загрузки материалов. Существующие модели используют анализ кривых температуры, полученные по диаметру колошника, – в них оптимальному режиму плавки соответствует кривая Л-образной формы. На практике часто используются один или два графика (по количеству термобалок) – по одной или двум диаметральной хордам. Использование показаний тепловизора позволяет определять характерный вид, основываясь на измерениях по всему колошнику. Такие термограммы обладают высоким разрешением. Нормальный технологический режим работы доменной печи должен обеспечить бесперебойный интенсивный, но в то же время ровный ее ход для получения наиболее высоких показателей по производству чугуна, удовлетворяющего требованиям.

Нормальный ход определяется равномерной температурой периферии с глобальным максимумом в центре. Характерное тепловизионное изображение поверхности засыпи ровного хода доменной печи представлено на рис. 3 а.

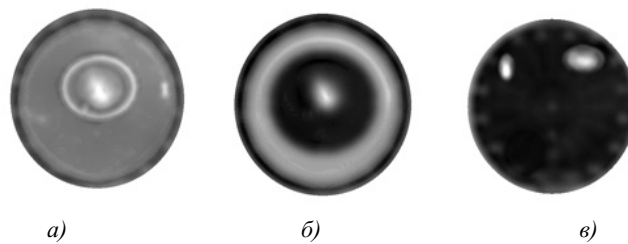


Рис. 3. Тепловизионное изображение поверхности засыпи шихты:
а) ровный ход печи, б) периферийный ход, в) канальный ход

Длительная работа с развитым периферийным ходом печи приводит к разогреву периферийной части, нежелательному превышению температуры кладки шахты. Вместе с тем, происходит устойчивое загромождение осевой части печи, что, как правило, сопровождается охлаждением печи или резким снижением нагрева чугуна и шлака и снижением производительности. Характерное тепловизионное изображение поверхности засыпи шихты при периферийном ходе доменной печи представлено на рис. 3 б.

Яркости точки на представленном тепловизионном изображении соответствуют температурам: светлые области – горячие, темные – холодные, а значит, более разогретая периферийная часть засыпи будет выделена более светлым оттенком.

Канал – разрыхленный участок по высоте столба шихтовых материалов, по которому устремляется усиленный поток газов. На поверхности засыпи проявляется как образование относительно высоко нагретой зоны. Причинами образования канала чаще всего бывают: увеличение содержания мелочи в шихте; излишнее количество дутья; неравномерное распределение дутья по фурмам; работа на вязких и холодных шлаках; неравномерное распределение природного газа по фурмам; неравномерная кусковатость шихтовых материалов. Резко выраженный канальный ход печи находит отражение на диаграммах контрольно-измерительных приборов: давление горячего дутья непостоянное и резко колеблется; давление газа на колошнике неустойчивое. Температура колошникового газа по газоотводам резко отлична для каждого из них, а значит, и температура на поверхности засыпи имеет значительную разницу по областям, разница может достигать 100–150 °С. Температура периферии колошника неравномерна, с резким повышением или понижением в отдельных точках. Характерное тепловизионное изображение поверхности засыпи шихты при канальном ходе доменной печи представлено на рис. 3 в.

Поддержание ровного хода доменной печи в производственных условиях оказывается трудоемкой задачей (с позиции оперативности). Изменение гранулометрического состава и порций шихты изменяет газопроницаемость столба шихтовых материалов и влияет на реакции окисления и восстановления, что, в свою очередь, сказывается на равномерности теплообмена на поверхности шихты. Имеющихся

средств анализа температуры поверхности засыпи шихты недостаточно, чтобы определить вид отклонения и точно локализовать область прорыва газового потока с высокой точностью и разрешением. Кроме того, перекося хода возникает не внезапно, а с течением времени, когда отклонения от оптимума в столбе шихтовых материалов накапливаются в ходе длительного процесса опускания шихты.

Таким образом, анализ факторов, вызывающих отклонения от ровного хода доменной печи, позволяет выделить среди них такие, посредством регулирования которых может быть осуществлено управление процессом доменной плавки в условиях реального производства. Изменение температуры горячего дутья может изменить перепад давления, скорректировать ход доменной печи. Однако для обеспечения функциональности воздухонагревателей температуру дутья следует держать постоянной на максимальном уровне, обеспечиваемом мощностью воздухонагревателей. Изменение пространственного распределения шихтовых материалов при загрузке печи как превентивная мера корректировки процесса плавки с большим временем запаздывания – технологически наиболее простой и эффективный способ управления ходом доменной печи.

Необходимым условием надежной идентификации отклонений от ровного хода доменной печи является определение размеров областей на температурной карте поверхности засыпи шихты и их соответствия положению загрузочного устройства при выгрузке материалов. Для устойчивого регулирования аномальных режимов плавки доменной печи корректировочная порция шихты имеет определяющее значение. Чтобы не вызывать перекося хода печи, порцию корректировки в большинстве случаев следует выбирать достаточной для одного или более оборотов вращающегося распределителя.

Расчет материального баланса основан на законе сохранения массы веществ. Зная химический состав и массу шихтовых материалов, массу и состав чугуна, состав шлака и газа, можно составить приходные и расходные статьи баланса. В случае, когда область нагрета свыше оптимальной термограммы, необходимо охлаждение путем добавления руды. Для этого определяется количество теплоты, поглощаемое для охлаждения коксо-рудной смеси, основываясь на величинах рудной нагрузки, теплоемкости кокса, температуры холодной руды, а также площади корректировки.

$$W_p = \frac{v \cdot \rho_p}{t_l} \cdot \left(\frac{\sum_i^m T[r][i]}{m} - \frac{\sum_j^{n-k} T[r][j]}{n \cdot k} \right) \cdot C_{\text{смеси}},$$

$$\left(\frac{\sum_j^{n-k} T[r][j]}{n \cdot k} - 20 \right) (c_1 \cdot pr_1 + c_2 \cdot pr_2)$$

где n – количество значений температуры внутри r -го кольца k -й термограммы выбранного оптимума; k – количество термограмм в усредненном оптимуме; m – количество значений температуры внутри r -го кольца; $S[r]$ – площадь r -го кольца; v – скорость схода шихты, ρ_p – плотность шихты; $C_{\text{смеси}}$ – теплоемкость смеси; W_p – количество руды для прогрева охлажденной области шихты.

Таким образом, для каждого концентрического кольца выгрузки шихтовых материалов можно рассчитать необходимое количество руды W_p для последующей корректировки хода печи в зависимости от знака температурных отклонений. Предложенный метод принятия решений по управлению доменной печью в отличие от существующих позволяет наиболее полно использовать данные температуры по всем точкам колошника, локализовать аномальные области. Концепция управления может быть построена на анализе ретроспективных данных. В процессе обучения с учителем, в роли которого выступает технолог, могут быть определены наиболее выгодные режимы плавки.

Выводы

Черная металлургия является важной отраслью промышленности страны, широко востребованы инновации, позволяющие повысить качество и снизить себестоимость продукции, в том числе и передельного чугуна, выплаваемого в доменных печах. Уровень засыпи влияет на точность построения термограмм в мировых координатах. Адаптированное применение геометрической модели тепловизионного изображения поверхности засыпи доменной печи к измерениям уровня с высоким разрешением позволяет повысить точность сопоставления термограмм траекториям загрузки, как при ровном ходе доменной печи, так и при перекосах загрузки. Выданные системой рекомендации для принятия решений по типу корректировки траектории загрузочного устройства и весу порции позволяют персоналу оперативно реагировать и поддерживать работу печи в оптимальном режиме, что обеспечивает более эффективное использование сырья и энергоресурсов при сохранении качества выплаваемого чугуна.

Литература

1. Большаков В. И., Лебедь В. В., Жеребецкий А. А. Использование современных средств контроля для управления радиальным распределением шихты в доменной печи // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2010. С. 53–66.
2. Большаков В. И., Рослик Н. А., Шутылев Ф. М., Икконен А. К., Степаненко В. Л., Зернов В. М. Патент № 2022025: Способ загрузки доменной печи.
3. Курунов И. Ф., Леонидов Н. К. Производство чугуна, измерения, контроль, управление процессами. Автоматизация процессов // *Производство чугуна и стали: итоги науки и техники*. М.: ВНИТИ АН СССР, 1987. Т. 17. С. 105–141.
4. Лаврухин А. И., Селяничев О. Л. Геометрическая модель тепловизионного изображения поверхности засыпи шихты доменной печи // *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2017. №1. С. 48–55.
5. Лаврухин А. И., Селяничев О. Л. Истинные размеры объектов на цифровых тепловизионных изображениях // *Череповецкие научные чтения – 2015: Материалы Всероссийской научно-практической конференции*. Череповец: ЧГУ, 2016. Ч. 3. С. 97–98.
6. Dean E. Draxton James G. Droppo, III Richard E. Hogle George Kychakoff – Application number US10657460 Other versions US20040052295A1 – Acoustic pyrometer

References

1. Bol'shakov V. I., Lebed' V. V., Zhrebetskij A. A. Ispol'zovanie sovremennykh sredstv kontrolya dlya upravleniya radial'nym raspredeleniem shikhty v domennoj pechi [The use of control

modern means for management of radial distribution of charges in the blast furnace]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii* [Fundamental and applied problems of iron and steel industry], 2010, pp. 53–66.

2. Bol'shakov V. I., Roslik N. A., Shutylev F. M., Ikkonen A. K., Stepanenko V. L., Zernov V. M. *Patent № 2022025 Sposob zagruzki domennoj pechi* [Patent № 2022025 Method of blast furnace discharge]

3. Kurunov I. F., Leonidov N. K. *Proizvodstvo chuguna, izmereniya, kontrol', upravlenie protsessami. Avtomatizatsiya protsessov* [Cast iron production, measurement, control, processes management. Processes automatization]. *Proizvodstvo chuguna i stali: itogi nauki i tekhniki* [Cast iron and steel processing]. Moscow: VNITI AN SSSR, 1987, T. 17, pp. 105–141.

4. Lavrukhin A. I., Selyanichev O. L. Geometricheskaya model' teplovizionnogo izobrazheniya poverkhnosti zasypi shikhty domennoj pechi [Geometrical model of thermovisional imaging of the surface of the blast furnace charged raw materials]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Cherepovets State University], 2017, no. 1, pp. 48–55.

5. Lavrukhin A. I., Selyanichev O. L. Istinnye razмеры ob"ektov na tsifrovyykh teplovizionnykh izobrazheniyakh [The correct dimensions in the digital thermovisional images]. *Cherepovetskie nauchnye chteniya – 2015: Materialy Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Cherepovets Scientific Readings – 2015: Reports of All-Russian research and practice conference]. Cherepovets: CHSU, 2016, vol. 3, pp. 97–98.

6. Dean E. Draxton James G. Droppo, III Richard E. *Hogle George Kychakoff. Application number US10657460 Other versions US20040052295A1 – Acoustic pyrometer.*

Для цитирования: Лаврухин А. И., Селяничев О. Л. Анализ температуры поверхности засыпи шихты как элемент системы поддержки принятия решений по управлению доменной печью // Вестник Череповецкого государственного университета. 2018. №6 (87). С. 10–18. DOI: 10.23859/1994-0637-2018-6-87-1

For citation: Lavrukhin A. I., Selyanichev O. L. Analysis of temperature on the surface of charged raw materials as component of the decision support system for blast furnace management. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2018, no. 6 (87), pp. 10–18. DOI: 10.23859/1994-0637-2018-6-87-1