

Д. А. Кассим /к. т. н./, А. К. Тараканов /д. т. н./,
В. П. Лялюк /д. т. н./

Национальная металлургическая академия
Украины, г. Днепро, Украина

Определение траектории потока газа при вдувании в доменную печь пылеугольного топлива

D. A. Kassim /Cand. Sci. (Tech.)/,
A. K. Tarakanov /Dr. Sci. (Tech.)/,
V. P. Lyalyuk /Dr. Sci. (Tech.)/

National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro,
Ukraine

Determination of the trajectory of gas flow with pulverized coal injecting into the blast furnace

Цель. Определение путей нормализации газораспределения в нижней части доменной печи объемом 5000 м³ при переходе с технологии вдувания природного газа (ПГ) на технологию вдувания пылеугольного топлива (ПУТ).

Методика. На базе аналитического метода Лагранжа разработана методика определения траектории потока газа в нижней части доменной печи при истечении дутья из фурмы.

Результаты. Научно обосновано усиление периферийного потока газа в доменной печи при замене вдувания ПГ на вдувание ПУТ при одинаковой интенсивности плавки по сожженному коксу, что согласуется с выводами об уменьшении длины зоны горения и глубины проникновения газа к центру горна, полученными в результате анализа работы доменной печи объемом 5000 м³. Для устранения этого явления необходимо восстанавливать оптимальные значения полных энергий потоков дутья и горнового газа.

Научная новизна. Разработана методика определения траектории потока газа, формирующегося в фурменном очаге доменной печи.

Практическая значимость. Предложенная методика может быть использована в АСУ доменной плавки для управления распределением газового потока по радиусу нижней зоны доменной печи. (Ил. 2. Табл. 1. Библиогр.: 4 назв.)

Ключевые слова: доменная плавка, дутье, природный газ, пылеугольное топливо, горновой газ, полная энергия.

Постановка проблемы. В декабре 2015 г. на доменной печи № 9 объемом 5000 м³ предприятия «АрселорМиттал Кривой Рог» внедрили технологию вдувания ПУТ. В процессе освоения этой технологии возникло много технологических и технических проблем, таких как частые случаи деформации и горения воздушных фурм и холодильников. Главными причинами этого были значительная неравномерность протяженности зон горения перед фурмами по окружности горна и нерациональное изменение распределения газового потока по радиусу доменной печи после внедрения технологии вдувания ПУТ. На международной научно-производственной конференции доменщиков «Опыт внедрения и пути решения проблем освоения технологии вдувания ПУТ в доменном производстве» (г. Кривой Рог, 12–13 мая 2016 г.) в докладе предприятия прозвучало, что при вдувании ПГ обычно был более развит центральный поток газа, а при использовании технологии ПУТ поток газа стал периферийным

и неравномерным по окружности доменной печи [1].

Формулировка цели. Опыт внедрения технологии вдувания ПУТ на доменной печи объемом 5000 м³ показал значительную неопределенность в оценке размеров зон горения перед фурмами и распределении газового потока по радиусу печи. С целью повышения эффективности использования пылеугольного топлива в доменной плавке необходимо разработать методику определения изменения траектории газового потока в нижней зоне доменной печи при переходе с вдувания ПГ на вдувание ПУТ, что позволит более полно осуществлять оценку и регулирование размеров зон горения перед фурмами печи и газораспределения по радиусу нижней зоны печи.

Фактический материал. При исследовании траекторий движения газа выделяют два принципиально различных аналитических метода: Эйлера и Лагранжа. Для построения газодинамических сеток движения потока газа в доменной

печи чаще используют метод Эйлера. Однако метод Лагранжа проще и даёт, по нашему мнению, более наглядную картину движения газового потока в рабочем пространстве доменной печи. Используя этот метод, можно показать, как изменяется поток газа в нижней зоне печи при переходе с технологии вдувания ПГ на технологию вдувания ПУТ при одинаковой интенсивности доменной плавки.

Для ответа на вопрос, как изменяется траектория движения потока газа после истечения дутья из фурмы доменной печи при замене ПГ на ПУТ, определим сначала траекторию оси потока дутья, истекающего из фурмы. Для этого в центре O на срезе воздушной фурмы (рис. 1) расположим начало координатных осей X и Y . В указанной точке O мысленно поместим частицу газа, имеющую массу m и движущуюся со скоростью v .

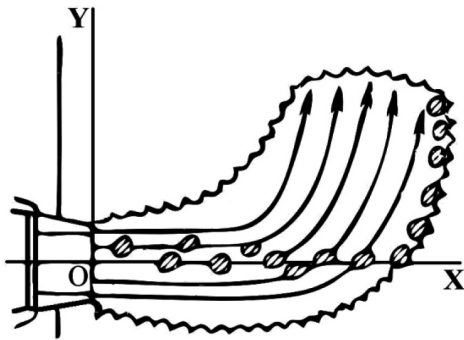


Рис. 1. Конфигурация фурменного очага

Векторное уравнение движения частицы имеет вид:

$$\Delta \vec{r} = v\tau + \frac{\vec{a}\tau^2}{2}, \quad (1)$$

где \vec{r} – радиус-вектор; \vec{a} – ускорение; τ – время.

Проецируя это уравнение на оси координат, получаем два уравнения проекций, определяющих положение частицы в момент времени τ ; при этом учитываем, что частица начинает свое движение горизонтально. После решения этих уравнений относительно τ получаем уравнение траектории оси потока (струи) газа после истечения дутья из фурмы доменной печи:

$$v \cdot \sqrt{\frac{2Y}{a_Y}} + \frac{a_x}{a_Y} Y = X. \quad (2)$$

Для определения неизвестных v , a_x и a_y , входящих в уравнение (2), рассмотрим профиль скоростей на срезе воздушной фурмы, а также движение частицы как результат двух составляющих движения вдоль осей X и Y .

Начальная скорость движения частицы v из точки O равна максимальной скорости v_{\max} на профиле скоростей, которая для турбулентного потока после приведения расхода дутья к нормальным условиям определяется по формуле:

$$v = v_{\max} = 775,7 \frac{Q_{od} \cdot T_d}{n \cdot d_{\phi}^2 \cdot Re_{\phi}^{1/38} \cdot P_d}, \quad \text{м/с}, \quad (3)$$

где Q_{od} – нормальный объемный расход дутья, измеренный приборами на печи, $\text{м}^3/\text{с}$; T_d – температура дутья, К ; n – количество воздушных фурм; d_{ϕ} – диаметр фурмы, м ; Re_{ϕ} – критерий Рейнольдса; P_d – абсолютное давление дутья, Па .

Движение частицы по оси X (рис. 1) можно рассматривать как результат равнопеременного движения под действием силы, обусловленной работой по проталкиванию частицы через слой шихты от фурмы к центру печи за вычетом силы трения частиц о слой шихты. Тогда величину ускорения по оси X можно определить по уравнению:

$$a_x = 287 \frac{T_d - T_y}{R_z(1 + \lambda_x)} + 111092,7 \times \frac{Q_{od}^2 \cdot T_d^2}{n^2 \cdot d_{\phi}^4 \cdot P_d^2 \cdot R_z \cdot (1 + \lambda_x)}, \quad \text{м/с}^2, \quad (4)$$

где T_y – температура газа в центре горна, К ; R_z – радиус горна, м ; λ_x – коэффициент трения.

Движение частицы по оси Y (рис. 1) можно рассматривать как результат равнопеременного движения под действием: силы, обусловленной работой по проталкиванию частицы через слой шихты от горна до колошника печи; подъемной силы, обусловленной разностью плотностей газа в горне и на колошнике за вычетом силы трения частиц о слой шихты и веса частицы. Тогда величину ускорения по оси Y можно определить по уравнению:

$$a_y = 294,6 \frac{T_m - T_k}{H} + 9,8 \left(\frac{T_m \cdot P_k}{T_k \cdot P_g} - 1 \right) - \lambda_y - 1, \quad \text{м/с}^2, \quad (5)$$

где T_m – теоретическая температура горения, К ; T_k – температура колошника, К ; P_g и P_k – абсолютное давление газа в горне и на колошнике, Па ; λ_y – коэффициент трения.

Для определения коэффициентов трения λ_x и λ_y в слое кокса можно воспользоваться рекомендациями авторов работы [3].

Таким образом, используя производственные данные конкретной доменной печи и выполнив зондирование горна для замера температуры в центре горна, находим по уравнению (2) траекторию оси струи потока газа.

Для нахождения траектории всей струи определяем профиль ее скорости на срезе фурмы, для чего воспользуемся законом распределения осреднённых скоростей в турбулентном ядре потока:

$$v_y = v_{\max} - 5,75 \cdot \sqrt{\frac{\tau_{\max}}{\rho_d}} \cdot \lg \frac{r_{\phi}}{y}, \quad \text{м/с}, \quad (6)$$

где v_y – скорость частицы в определенной точке выходного сечения фурмы, м/с ; τ_{\max} – касатель-

ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

ное напряжение у стенки фурмы, $\text{H}/\text{м}^2$; $r_{\text{ф}}$ – радиус фурмы, м; y – расстояние от стенки фурмы до данной точки, м.

Расчеты показывают, что при расходе дутья $7800\text{--}8000 \text{ м}^3/\text{мин}$ и диаметре фурм 150 мм $\tau_{\text{max}} = 47,1 \text{ Н}/\text{м}^2$, а толщина ламинарной пленки у стенки воздушной фурмы печи $\delta = 0,00006 \text{ м}$. Построив определенное количество траекторий различных точек профиля скорости на срезе воздушной фурмы, получим траекторию всего потока дутья и газа. Однако для визуализации формы струи достаточно построить траектории, соответствующие внешним границам струи.

В свое время доменная печь объемом 5000 м^3 была оборудована машиной для зондирования ее горна, и авторы работы [4] выполнили большое количество зондирований с замером температур по радиусу горна. Ими было установлено, что на интенсивно работающей доменной печи при расходе дутья $\geq 7800 \text{ м}^3$ температура в центре горна находится на уровне не менее $T_{\text{ц}} = 1300 \text{ }^\circ\text{C}$, которую можно использовать при определении a_x . При вдувании в фурмы ПГ в приведенных формулах вместо $Q_{\text{од}}$ и $T_{\text{д}}$ необходимо использовать приведенный к нормальным условиям расход смеси газа и воздуха $Q_{\text{осм}}$ и ее температуру $T_{\text{см}}$ [2].

Изложение основных результатов исследований. Техничко-экономические показатели работы доменной печи объемом 5000 м^3 при приблизительно одинаковой интенсивности доменной плавки в лучший период ее работы при вдувании природного газа (октябрь 2006 г.) и при вдувании ПУТ (март 2016 г.) приведены в таблице [1]. Сравнение приведенных в таблице значений полных механических энергий комбинированного дутья и горнового газа указывают

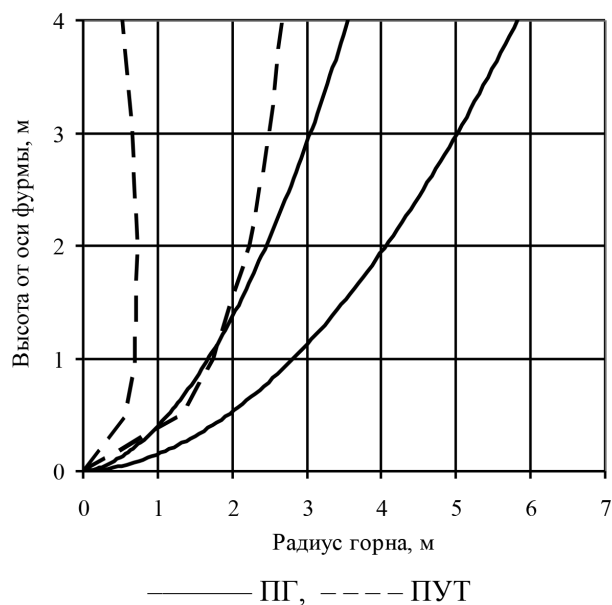


Рис. 2. Траектории потока дутья-газа в доменной печи

на уменьшение длины зоны горения и глубины проникновения горнового газа к центру горна [2] при переходе с вдувания природного газа на вдувание пылеугольного топлива. На это указывают и траектории потока газа в нижней части доменной печи, построенные по приведенной методике (рис. 2).

Вывод. При одинаковой интенсивности доменной плавки вдувание ПУТ в сравнении с вдуванием природного газа способствует уменьшению длины зоны горения и развитию периферийного потока газа в доменной печи. Для обеспечения оптимального газораспределения в нижней части печи необходимо при любых изменениях технологии доменной плавки кон-

Таблица 1

Техничко-экономические показатели работы доменной печи объемом 5000 м^3 при работе на ПГ и ПУТ [1]

Показатели	Октябрь 2006	Март 2016
Длительность периода, сут.	31	31
Производительность, т/сут.	9826	9340
Приведенная производительность, т/сут.	9826	11479
Расход кокса (К), кг/т	426,8	451,7
Приведенный расход кокса, кг/т	426,8	409,8
Расход антрацита (А), кг/т	56	0,0
Расход ПУТ, кг/т	0,0	71,4
Интенсивность (К+А+ПУТ), кг/м ³ сут.	948,8	977,1
Дутье: расход, м ³ /мин	7812	7953
давление, кПа	337	328
температура, °	1090	990
Расход природного газа (ПГ), м ³ /т	87,1	11,0
Содержание кислорода в дутье, %	30,5	24,3
Полная механическая энергия комбинированного дутья, кДж/с	2034,8	1555,7
Полная механическая энергия горнового газа, кДж/с	5113,7	3928,6

тролировать величины полных механических энергий дутья и горнового газа, указывающих на изменение длины зоны горения и глубины проникновения горнового газа к центру печи. Нежелательно снижать эти энергии ниже значений, полученных в периоды ровной высокопроизводительной работы доменной печи с низким расходом кокса. Для полной нормализации распределения газового потока по радиусу доменной печи необходимо описанное регулирование снизу дополнять регулированием сверху путём корректировки режима загрузки печи.

Библиографический список / References

1. Опыт внедрения и пути решения проблем освоения технологии вдувания ПУТ на доменной печи объемом 5000 м³ / Д. В. Пинчук, П. И. Оторвин, А. В. Романчук и др. // Наукові праці всеукраїнської науково-технічної конференції, присвяченої 100-чиччю з дня народження Г.Г. Єфіменка, 4-5 квітня 2017 р., НМетАУ, м. Дніпро. – Дніпро: НМетАУ, 2017. – С. 122–128.

D.V. Pinchuk, P.I. Otorvin, A.V. Romanchuk and others. (2017). *Опыт внедрения и пути решения проблем освоения технологии вдувания ПУТ на доменной печи объемом 5000 м³*. [Experience of implementation and ways of solving the problems of mastering the technology of PUT injection on a blast furnace with the volume of 5000 m³]. *Naukovi pratsi vseukrayinskoji naukovo-tehnichnoyi konferentsiyi, prisvyachenoyi 100-richy z dnya narodzhennya G.G. Efimenka, 4-5 kvitnya 2017 r. Dnipro, NMetAU, pp. 122-128.*

2. Лялюк В. П. Современные проблемы технологии доменной плавки / В. П. Лялюк. – Днепропетровск: Пороги, 1999. – 164 с.

Lyalyuk V.P. (1999). *Sovremennye problemy tehnologii domennoj plavki*. [Modern problems of blast furnace technology]. Dnepropetrovsk, Porogi.

3. Ковшов В. Н. Методика определения газодинамических характеристик доменной шихты / В. Н. Ковшов, В. А. Петренко, Н. В. Терещенко // *Металлургия и коксохимия: Респ. межвед. науч.-техн. сб.* – К.: Техника, 1980. – Вып.70. – С. 31–34.

Kovshov V.N., Petrenko V.A., Tereschenko N.V. (1980). *Metodika opredeleniya gazodinamicheskikh harakteristik domennoy shihtyi* [Method for

determination of gasdynamic characteristics of blast furnace charge]. *Metallurgiya i koksohimiya, Vol.70*, pp. 31-34.

4. Шулико С. Т. Распределение температуры по радиусу горна доменной печи объемом 5000 м³ / С. Т. Шулико, В. Е. Геращенко // *Вопросы теории и практики производства чугуна.* – М.: *Металлургия*, – 1983. – С. 45–50.

Shuliko S. T., Geraschenko V. E. (1983). *Raspredelenie temperatury po radiusu gorna domennoy pechi ob'emom 5000 m3* [Distribution of temperature along the radius of the blast furnace with a volume of 5000 m³]. *Voprosyi teorii i praktiki proizvodstva chuguna* [Theory and practice of iron production]. Moscow, Metallurgic, pp. 45-50.

Purpose. *Determination of recovery paths of the optimal gas distribution in the furnace with volume of 5000 m3 at the transition from the technology of natural gas (NG) injection to the technology of pulverized coal injection (PCI).*

Methodology. *On the basis of the analytical Lagrange method the method of determining a path of gas flow in the blast furnace is developed.*

Findings. *Scientifically substantiated the development of the peripheral gas flow in the blast furnace when replacing the natural gas by the PCI, which is consistent with the conclusions on the reduction of the length of the combustion zone and the depth of penetration of the hearth gas to the center of the hearth, obtained as a result of the analysis of the furnace with a volume of 5000 m3 operation. To avoid this phenomenon it is necessary to restore the optimal values of the total energy and blast furnace gas.*

Originality. *A methodology for determining of blast flow path in the blast furnaces was developed. It was found that at the same intensity of coke burnt the transition to PCI technology enhanced peripheral gas stream.*

Practical value. *Developed methodical approaches can be used in blast furnace smelting for controlling gas flow distribution along the radius of the furnace.*

Key words: *blast-furnace smelting, blast, natural gas, pulverized coal, gas hearth, full energy.*

**Рекомендована к публикации
д. т. н. А. К. Таракановым**

Поступила 5.08.2017