



УДК 669.162.221.2

DOI 10.17073/0368-0797-2024-2-148-154



Оригинальная статья
Original article

ОЦЕНКА АВАРИЙНОСТИ ДОМЕННЫХ ФУРМ

Т. С. Стук[✉], Е. П. Потоцкий

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

✉ lazareva.ts@misis.ru

Аннотация. В современном доменном производстве даже кратковременное нарушение технологического процесса связано с большими потерями производительности. В практике ведения доменной плавки нередко встречаются значительные отклонения от оптимального режима. Они могут привести не только к расстройкам хода доменной печи, но и к авариям. В работе доменной печи к типичным отклонениям от нормального распределения потока газа и шихтовых материалов относят: периферийный, осевой, канальный ходы; перекося уровня засыпи; различной степени и вида подвешивания шихты. Вследствие этого происходят похолодание или излишний перегрев печи, нарушение ровности хода. Тяжелым последствием длительного периферийного движения газов являются не только интенсивный износ кладки, слабое использование тепловой и химической энергии газов, но и стабильное загромождение горна с образованием тотермана. Тотерман – это рудно-коксый спек, образующийся в фурменной зоне доменной печи в результате похолодания ее центра. Данная работа посвящена исследованию и анализу нарушений работы доменной печи, анализу причин возникновения тотермана, оценке аварийности фурм доменной печи. Нарушение газораспределения и загромождение горна приводят к образованию тотермана, который провоцирует массовое горение фурм и холодильников доменной печи. Разработанные методические основы (математическая модель) позволяют оценить максимальную температуру фурменной зоны и результирующий тепловой поток на носок фурмы при наличии тотермана. Показано, что в доменных печах большого объема преобладает пузырьковый поток истечения газо-угольного потока, способствующий росту тотермана доменной печи.

Ключевые слова: черная металлургия, доменное производство, доменная печь, фурма, тотерман, фурменная зона, повышение температуры, результирующий тепловой поток, прогар

Для цитирования: Стук Т.С., Потоцкий Е.П. Оценка аварийности доменных фурм. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2024;67(2): 148–154. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-2-148-154>

ESTIMATION OF ACCIDENT RATE OF BLAST FURNACE TUYERES

T. S. Stuk[✉], E. P. Pototskii

National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

✉ lazareva.ts@misis.ru

Abstract. In modern blast furnace production, even a short-term disruption of the technological process is associated with large productivity losses. In the practice of conducting blast furnace melting, there are often significant deviations from the optimal mode. They can lead not only to disruptions of the blast furnace, but also to accidents. In the operation of a blast furnace, typical deviations from the normal distribution of gas flow and charge materials include: peripheral, axial, channel passages; skewing of the backfill level; varying degrees and types of charge suspension. As a result, there are a cooling or excessive overheating of the furnace and violation of the melting operation. A serious consequence of the prolonged peripheral movement of gases is not only intensive wear of the lining, poor use of thermal and chemical energy of gases, but also stable clattering of the hearth with formation of a deadman. Deadman is an ore-coke sinter formed in the tuyere zone of a blast furnace, as a result of cooling of its center. The paper describes the study and analysis of violations of blast furnace operation, analysis of the deadman causes and assessment of the accident rate of blast furnace tuyeres. Violation of gas distribution and hearth clattering lead to formation of a deadman, which provokes mass burning of tuyeres and blast furnace refrigerators. The developed methodological foundations (mathematical model) allow us to estimate the maximum temperature of the tuyere zone and the resulting heat flow to the tuyere toe in presence of a deadman. It is shown that in large-volume blast furnaces, bubble outflow of the gas-coal flow prevails, contributing to growth of a deadman in the blast furnace.

Keywords: ferrous metallurgy, blast furnace production, blast furnace, tuyere, deadman, tuyere zone, temperature increase, resulting heat flow, burnout

For citation: Stuk T.S., Pototskii E.P. Estimation of accident rate of blast furnace tuyeres. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2024;67(2):148–154. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-2-148-154>

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день политика металлургических компаний в области промышленной безопасности сводится к утверждению, что аварии и чрезвычайные ситуации на производственных объектах могут быть предупреждены. Поэтому для предотвращения аварийных ситуаций на предприятиях активно внедряются и используются различные методики по проведению анализа опасностей и оценке риска аварий.

Несмотря на тенденцию уменьшения количества аварий, число инцидентов в металлургическом производстве остается на постоянно высоком уровне. Число аварий составляет от 4 до 9 в год, но распределение их по металлургическим производствам различно¹ (рис. 1). Наиболее опасными являются доменное, кислородно-конвертерное, электросталеплавильное и коксохимическое производства.

К наиболее опасным видам аварий доменного производства относят: уход чугуна и (или) шлака из металлургических агрегатов; прорывы горна, холодильников, воздухопроводов доменных печей, а также взрывы в металлургических агрегатах из-за подачи сырой шихты и прогара фурм [1; 2].

По данным отчета ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (НЛМК) за 2020 г. фурмы доменных печей выходили из строя более 200 раз (рис. 2). На рис. 3 представлена статистика отказов доменных фурм в процентном соотношении.

Типичными отклонениями от нормального распределения потока газа и шихтовых материалов бывают: периферийный, осевой, канальный ходы; перекося уровня засыпи; различной степени и вида подвисания шихты (в том числе так называемый «тугой» ход) [3; 4].

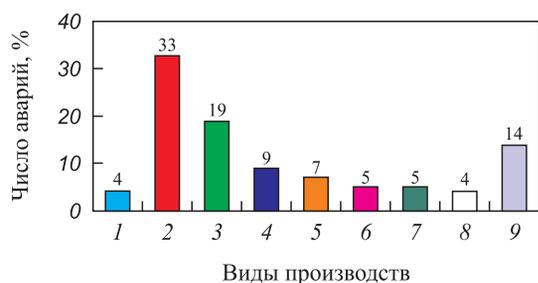


Рис. 1. Распределение аварий по видам производств:

1 – агломерационное; 2 – доменное; 3 – кислородно-конвертерное; 4 – коксохимическое; 5 – литейное; 6 – производство кислорода; 7 – прокатное; 8 – ферросплавное; 9 – электросталеплавильное

Fig. 1. Distribution of accidents by type of production:

1 – agglomeration; 2 – blast furnace; 3 – oxygen converter; 4 – coke-chemical; 5 – foundry; 6 – oxygen production; 7 – rolling; 8 – ferroalloy; 9 – electric furnace steelmaking

¹ Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в период с 2010 по 2020 г. URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (дата обращения: 25.01.2024).

Вследствие этого происходит похолодание или излишний перегрев печи, перегруз ее осевой зоны минеральной шихтой, нарушение ровности хода. Возникают условия для загромождения горна с частым горением воздушных фурм. При длительных канальных ходах происходит неравномерный разгар профиля или застой шихтовых материалов с образованием настывлей [5].

Загромождение горна доменной печи плохо сказывается на тепловом режиме, требуя сокращения рудных нагрузок. В горне при снижении температуры в большом количестве образуется графит [6]. Нагрев горна ухудшается из-за образования в нем периферийного хода, так как при загрузке неподготовленного шихтового материала наблюдается снижение нагрева [4]. На фурмах образуется холодный железистый шлак.

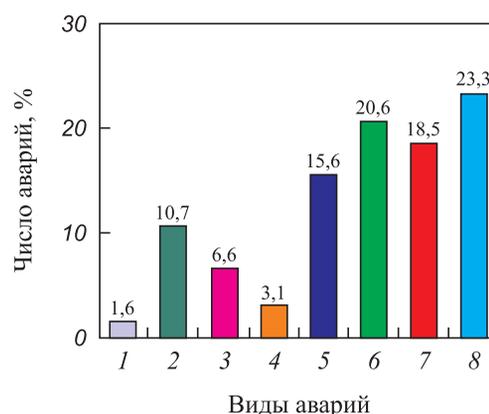


Рис. 2. Основные виды аварий:

1 – разрыв кожуха доменной печи; 2 – разрыв трубопроводов большого диаметра; 3 – взрыв в металлургических агрегатах; 4 – обрушение здания; 5 – пожар; 6 – уход чугуна и/или шлака из металлургических агрегатов; 7 – прорывы горна, холодильников, воздухопроводов доменной печи; 8 – взрывы в металлургических агрегатах из-за подачи сырой шихты и прогара фурм

Fig. 2. Main types of accidents:

1 – rupture of blast furnace jacket; 2 – rupture of large diameter pipelines; 3 – explosion in metallurgical units; 4 – building collapse; 5 – fire; 6 – removal of cast iron and/or slag from metallurgical units; 7 – breakthrough of the hearth, refrigerators, air ducts of blast furnace; 8 – explosion in metallurgical units due to supply of raw charge and tuyeres burnout



Рис. 3. Статистика отказов доменных фурм

Fig. 3. Failure statistics of blast furnace tuyeres

Попаданию водяного пара в горн посредством прогара холодильного оборудования также способствует перегрузка малоподвижной зоны при наличии малой кинетической энергии [7]. В результате этого отклонения возникает процесс загромождения в подфурменном поясе доменной печи. При расширении зоны загромождения активно начинается процесс горения фурменных приборов, как изображено на рис. 4.

Тяжелым расстройством технологического процесса плавки является загромождение горна [4; 8]. Оно способствует ухудшению газодинамики процесса и заметно сокращает рабочее пространство металлоприемника, способствует уменьшению перемещения жидкого чугуна в горне и загромождает пространство перед носком фурмы. При похолодании центра горна доменной печи кокс со шлаком начинают спрессовываться в монолит благодаря мелкой фракции шихтового материала [9; 10]. Это способствует плохой фильтрации горна, тем самым затрудняя стекание продуктов плавки в металлоприемник доменной печи.

Несмотря на большое количество разработанных и применяемых методик по оценке риска аварий в доменном производстве, необходима методика, которая смогла бы учесть специфику работы доменной печи с учетом образования в фурменной зоне тотермана и увеличения температуры в фурменной зоне с последующим прогаром фурм и пр. Поэтому совершенствование методики оценки аварийности доменных фурм с учетом образования тотермана в настоящее время является актуальной задачей.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ

Большой вклад в исследование загромождения фурменной зоны внес НИТУ «МИСИС» в лице Жеребина Б.Н., Вегмана Е.Ф., Паренькова А.Е и др. [1; 11].

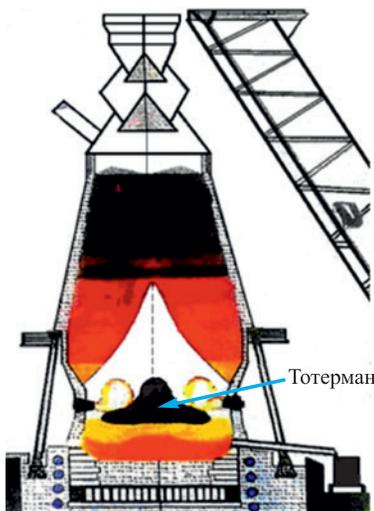


Рис. 4. Процесс загромождения горна рудно-коксовым спеком

Fig. 4. Hearth cluttering with ore-coke sinter

Известно, что доменные печи большого объема (доменная печь № 5 комбината «Криворожсталь») склонны к образованию крупных греналей в центральной части горна. Валунообразное образование (тотерман) с вершиной, которая достигает уровня заплечиков, состоит из тугоплавких карбидов и карбонитридов. Тотерман препятствует нормальному газораспределению и способствует образованию периферийного хода доменной печи [12; 13]. Дутье фурм отражается от поверхности тотермана на футеровку и гарнисаж доменной печи. Это приводит к ухудшению стойкости гарнисажа и способствует возникновению аварийной ситуации вследствие прорыва высокотемпературных продуктов плавки доменной печи.

В работе предложена методика оценки аварийности фурм доменной печи под влиянием тотермана.

В доменных печах реализуются два устойчивых гидродинамических режима продувки: струйный и пузырьковый [14; 15]. Струйный режим истечения характерен для нормального газораспределения доменной печи, а пузырьковый режим истечения потока способствует росту тотермана.

Значение критерия Глинкова G_n определяется по формуле

$$G_n = \frac{\rho_r w_r^2}{\rho_{ж} g h_{ж}}, \quad (1)$$

где ρ_r – эффективная плотность потока, кг/м^3 ; w_r – скорость на выходе из фурмы, м/с ; $\rho_{ж}$ – плотность расплава в фурменной зоне, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; $h_{ж}$ – расстояние от оси фурмы до распара, м .

Эффективная плотность потока вычисляется по формуле

$$\rho_r = Q_v \rho_{гд} + Q_{пр} \rho_{пр} + Q_{уг} \rho_{уг}, \quad (2)$$

где Q_v , $Q_{пр}$, $Q_{уг}$ – объемные доли «воздух + кислород», природного газа и пылеугольного топлива; $\rho_{гд}$, $\rho_{пр}$, $\rho_{уг}$ – плотности горячего дутья, вдуваемого природного газа и пылеугольного топлива.

Плотность горячего дутья рассчитывается по формуле

$$\rho_{гд} = \rho_0 \frac{PT_0}{P_0 T_d}, \quad (3)$$

где $\rho_{гд}$ – плотность горячего дутья, кг/м^3 ; ρ_0 – плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м^3 ; P – давление горячего дутья, атм ; P_0 – атмосферное давление воздуха, атм ; T_0 – температура окружающей среды, К ; T_d – температура дутья, К .

Плотность вдуваемого природного газа определяется по формуле

$$\rho_{пр} = \rho_0^{пр} \frac{P}{P_0}, \quad (4)$$

где $\rho_0^{пр}$ – плотность природного газа, кг/м^3 .

Если критерий Глинкова меньше единицы, то имеет место пузырьковый режим; если критерий Глинкова более трех, то режим истечения струйный. При промежуточных значениях имеет место переходной режим истечения.

Теплоотдача тотермана главным образом происходит за счет излучения и конвекции. Для расчета результирующего теплового потока на носок фурмы необходимо определить температуру внутренней зоны продувки и гидродинамический режим продувки доменной печи. Температура зоны продувки соответствует температуре поверхности тотермана [1].

Из уравнения теплового баланса температуру поверхности тотермана T_t можно вычислить по формуле [16]

$$T_t = \frac{0,165T_f V_{\text{бост}}}{d_h^3} + 2,445(B - 483) + 2,91(T_{\text{жк}} - 107) - 11,2(\eta_{\text{CO}} - 27,2) + 28,9(d_{\text{проке}} - 25,8) + 326, \quad (5)$$

где T_f – теоретическая температура горения, °C; $V_{\text{бост}}$ – объем газа в заплечиках, мм³/мин; d_h – диаметр горна, м; B – расход топлива, кг/т; $T_{\text{жк}}$ – индекс жидкотекучести шлака; η_{CO} – содержание CO в центре печи (из шахты); $d_{\text{проке}}$ – диаметр частиц кокса в тотермане, мм.

Индекс жидкотекучести шлака ($T_{\text{жк}}$) рассчитывается по формуле

$$T_{\text{жк}} = T_{\text{жч}} - \left\{ 342 \left(\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} \right) + 11,0[(\text{Al}_2\text{O}_3) + 1,4] + 819 \right\}, \quad (6)$$

где $T_{\text{жч}}$ – температура жидкого чугуна, °C; $\left(\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} \right)$ – основность шлака; (Al_2O_3) – концентрация Al_2O_3 в шлаке, %.

Размер зоны продувки, т. е. зоны, в которой располагается горизонтальный газожидкостный поток и реакционная зона, определяется по формуле

$$l_{\text{зп}} = 5,44d_0 \left(G_n \frac{H_0}{d_0} \right)^{0,24}, \quad (7)$$

где $l_{\text{зп}}$ – длина зоны продувки, м; H_0 – высота жидкой ванны, м; d_0 – внутренний диаметр носка фурмы, м.

Эффективная степень черноты среза фурмы вычисляется по формуле

$$\varepsilon_{\text{эф}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_l} - 1 \right) \frac{S}{S_l}}, \quad (8)$$

где $\varepsilon_{\text{эф}}$ – эффективная степень черноты среза фурмы; ε_l – степень черноты срезы фурмы (принимается равной 0,6); S_l – площадь внутренней поверхности зоны

продувки, м; S – площадь металлической обечайки носка фурмы, м².

Площадь металлической обечайки носка фурмы S определяется по формуле

$$S = 0,785(d_n^2 - d_0^2), \quad (9)$$

где d_n – внешний диаметр носка фурмы, м; d_0 – внутренний диаметр носка фурмы, м.

Площадь внутренней поверхности зоны продувки S_l рассчитывается по формуле

$$S_l = \pi d_n l_{\text{зп}}, \quad (10)$$

где $l_{\text{зп}}$ – длина зоны продувки, м.

Результирующий тепловой поток q^p на срез фурмы [13] вычисляется по закону Стефана–Больцмана:

$$q^p = \varepsilon_{\text{эф}} \sigma (T_t^4 - T_1^4), \quad (11)$$

где $\varepsilon_{\text{эф}}$ – эффективная степень черноты среза фурмы; σ – постоянная Стефана–Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); T_t – температура поверхности тотермана, К; T_1 – температура многофазного потока в сечении фурмы, К.

ПРОВЕДЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЕГО РЕЗУЛЬТАТОВ

Предполагается, что от колошника до заплечиков имеет место плотный слой, сквозь который осуществляется фильтрация восходящих газов. Барботажный слой располагается в зоне, которая находится между заплечиками и горном [15; 17]. Шихта в барботажном слое присутствует в жидком состоянии. Потoki дутья, помимо воздуха, кислорода и природного газа, несут в себе частички пылеугля [18]. По данным табл. 1 определен критерий Глинкова.

Используя формулы (3) и (4), определены значения $\rho_{\text{гд}} = 0,61$ кг/м³, $\rho_{\text{пт}} = 2,08$ кг/м³. Эффективная плотность потока по формуле (2) равна $0,79$ кг/м³, а значение критерия Глинкова по формуле (1) составляет $0,27$, что указывает на пузырьковый режим истечения газоугольного потока в доменной печи.

Далее определена средняя температура поверхности тотермана. Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.

По формуле (6) рассчитан индекс жидкотекучести $T_{\text{жк}} = 837$ °C, а температура поверхности тотермана по формуле (5) $T_t = 2331$ °C, что на 231 °C превышает теоретическую температуру горения.

Для расчета результирующего теплового потока, который приходится на носок фурмы доменной печи, примем следующие допущения:

– зона продувки представляет собой цилиндрическую полость диаметром, равным внешнему диаметру фурмы;

Таблица 1. Исходные данные для расчета критерия Глинкова

Table 1. Initial data for calculating the Glinkov criterion

Наименование	Обозначение	Числовое значение
Расстояние от оси фурмы до распара, м	$h_{ж}$	5,8
Рабочая скорость газов на выходе из фурмы, м/с	w_r	250
Температура дутья на выходе из фурмы, °С	T_d	1255
Плотность пылеугля, кг/м ³	$\rho_{уг}$	1400
Плотность воздуха, кг/м ³	ρ_0	1,3
Давление горячего дутья, атм	P	2,6
Температура окружающей среды, К	T_0	273
Плотность природного газа, кг/м ³	$\rho_0^{пр}$	0,8
Давление воздуха, атм	P_0	1
Плотность расплава в фурменной зоне, кг/м ³	$\rho_{ж}$	3200
Ускорение свободного падения, м/с ²	g	9,8

– температура поверхности тотермана $T_t = 2331$ °С;
– выходные параметры фурмы, включая многофазный поток в этом сечении, имеют температуру $T_1 = 800$ °С;
– газовый поток, находящийся в зоне продувки, заполнен частичками угля и каплями расплава [18]. Излучение в нем подчиняется законам излучения абсолютно черного тела.

Исходные данные для расчета теплового потока на носок фурмы приведены в табл. 3.

Длина зоны продувки определена по формуле (7), она составила 1,43 м. Эффективная степень черноты среза фурмы, рассчитанная по формуле (8), равна 0,953. Площадь металлической обечайки носка фурмы S определена по формуле (9): $S = 0,033$ м², площадь внутренней поверхности зоны продувки S_l по формуле (10)

Таблица 3. Исходные данные для расчета теплового потока на носок фурмы

Table 3. Initial data for calculating the heat flow on tuyere toe

Наименование	Обозначение	Числовое значение
Внутренний диаметр носка фурмы, м	d_0	0,15
Внешний диаметр носка фурмы, м	d_n	0,25
Высота жидкой ванны, м	H_0	5,8
Степень черноты среза фурмы	ϵ_l	0,6
Температура поверхности тотермана, К	T_t	2573
Температура многофазного потока в сечении фурмы, К	T_1	1073

Таблица 2. Исходные данные для расчета средней температуры тотермана

Table 2. Initial data for calculating the average deadman temperature

Наименование	Обозначение	Числовое значение
Теоретическая температура горения, °С	T_f	2100
Объем газа в заплечиках, мм ³ /мин	$V_{бост}$	3,7
Диаметр горна, м	d_h	10,85
Расход топлива, кг/т	B	500
Содержание СО в центре печи, %	η_{CO}	25 – 34
Диаметр кокса в тотермане, мм	$d_{проке}$	до 20
Температура жидкого чугуна, °С	$T_{жч}$	1250
Основность шлака	(CaO/SiO ₂)	2 – 3
Концентрация Al ₂ O ₃ в шлаке, %	(Al ₂ O ₃)	6 – 10

составила 1,123 м². Результирующий тепловой поток q^p на срез фурмы, определенный по формуле (12), равен 2,3 МВт/м².

При работе в стационарном режиме (нагрев фурмы) происходит локальный контакт рывальной части с чугуном. Допустимый результирующий поток на срез фурмы должен быть не более 2,1 МВт/м² [19], что свидетельствует о том, что дальнейшее понижение температуры воды для охлаждения фурмы нерационально и приводит к температурным напряжениям. Это способствует уменьшению срока службы фурменного прибора и может спровоцировать массовый прогар фурм.

Увеличение температуры фурменной зоны для разных по объему доменных печей свидетельствует о необходимости дополнительных мероприятий по предупреждению прогара фурм. На рис. 5 представлена данная зависимость.

Таким образом, температура поверхности тотермана зависит от объема доменной печи. Повышение температуры отрицательно влияет на безопасный ход доменных печей большого объема, увеличивается вероят-

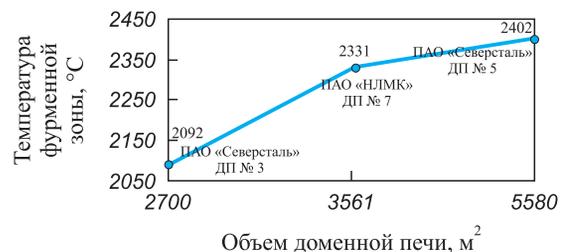


Рис. 5. Зависимость температуры фурменной зоны от объема доменной печи

Fig. 5. Dependence of tuyere zone temperature on blast furnace volume

ность взрыва газа и сокращается срок эксплуатации фурменных приборов.

Аварии при массовом прогаре фурм связаны с интенсивным парообразованием. Они сопровождаются попаданием в доменную печь большого количества воды [20]. Образующиеся прорывы водяного пара из-под слоя чугуна и шлака вызывают тепловой взрыв цепного характера.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЮ ПРОГАРА ФУРМ

В работе предложены мероприятия по предупреждению прогара фурм в зависимости от объема доменной печи и температуры фурменной зоны.

Для доменных печей объемом до 2700 м³ при температуре фурменной зоны до 2100 °С:

– автоматизированный анализ по ретроспективным данным статистических свойств перепада расхода охлаждающей воды;

– анализ содержания кремния в чугуне.

Для доменных печей объемом 2700 – 3500 м³ при температуре фурменной зоны 2100 – 2300 °С:

– автоматизированный анализ по ретроспективным данным статистических свойств перепада расхода охлаждающей воды;

– анализ содержания кремния в чугуне;

– рывную часть воздушной фурмы (носок фурмы) необходимо защищать огнеупорными материалами, в том числе плазменным напылением;

– внутренний стакан фурмы необходимо изготавливать из стального листа вместо медного с дополнительной футеровкой огнеупорными материалами.

Для доменных печей объемом 3500 – 5560 м³ при температуре фурменной зоны 2300 – 2400 °С:

– автоматизированный анализ по ретроспективным данным статистических свойств перепада расхода охлаждающей воды;

– анализ содержания кремния в чугуне;

– рывную часть воздушной фурмы (носок фурмы) необходимо защищать огнеупорными материалами, в том числе плазменным напылением;

– внутренний стакан фурмы необходимо изготавливать из стального листа вместо медного с дополнительной футеровкой огнеупорными материалами;

– режим подачи охлаждающей воды в фурму:

а) скорость технической воды до 11,6 м/с (обычный расход воды 4 – 5 м/с);

б) расход воды 30 м³/ч (обычный расход воды 12 – 16 м/ч);

в) давление воды 15 ати (обычный расход воды 5 – 6 ати).

Такой режим требует установки насосов высокого давления и более прочной аппаратуры:

– толщина носка фурмы должна быть не менее 40 – 50 мм;

– вязкость шлаков не более 4 – 5 пз, исключать загрузку кислых окатышей.

Выводы

Определено, что нарушение нормального газораспределения и загромождение горна приводит к образованию тотермана доменной печи, который провоцирует массовое горение фурменных приборов и холодильников.

Показано, что в доменных печах большого объема преобладает пузырьковый поток истечения газовой угольного потока, способствующий росту тотермана, который может привести к повышению аварийности фурменных приборов.

Предложенная методика (математическая модель) позволяет оценить максимальную температуру фурменной зоны и результирующий тепловой поток на носок фурмы при наличии тотермана.

На основании проведенного расчета температуры фурменной зоны предложены мероприятия по предупреждению прогара фурм в зависимости от объема доменной печи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Жеребин Б.Н., Пареньков А.Е. Неполадки и аварии в работе доменных печей. Новокузнецк; 2001:275.
2. Потоцкий Е.П., Лазарева Т.С. Анализ устойчивости и технологического процесса доменной печи. В кн.: *Труды IX Международной научно-практической конференции «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология»*. Москва: МИСиС; 2018:169–173.
3. Тарасов В.П., Хайретдинова О.Т., Томаш А.А. О газопроницаемости зоны размягчения в условиях доменной плавки. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2002;45(4):64–66.
Tarasov V.P., Khairtdinova O.T., Tomash A.A. On gas permeability of softening zone in conditions of blast furnace melting. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2002;45(4):64–66. (In Russ.).
4. Дмитриев А.Н., Шумаков Н.С., Леонтьев Л.И., Онорин О.П. Основы теории и технологии доменной плавки. Екатеринбург: УрО РАН; 2005:547.
5. Тарасов В.П., Тарасов П.В., Быков Л.В. Газодинамические параметры и показатели работы доменных печей с загрузкой БЗУ к ТЗУ. *Сталь*. 2005;(1):6–9.
Tarasov V.P., Tarasov P.V., Bykov L.V. Gas-dynamic parameters and performance indicators of blast furnaces with loading of BLT to carrier-loader. *Stal'*. 2005;(1):6–9. (In Russ.).
6. Григорьев Б.А., Цветков Ф.Ф. Тепломассообмен. Москва: МЭИ; 2005:93.
7. Мاستрюков Б.С. Безопасность в чрезвычайных ситуациях в природно-техногенной сфере. Прогнозирование последствий. Москва: ИЦ Академия; 2015:368.
8. Natano M.I. Influence of the method of loading the furnace profile, surface of the liquid phase on the gas flow in the blast furnace. Moscow: From Science; 2004:168.

9. Power D.J. Web-based and model-driven decision support systems: concepts and issues. In: *AMCIS 2000, America's Conference on Information Systems*. California; 2000: 173–186.
10. Аносов В.Г., Фоменко А.П., Крутас Н.В., Цаплина Т.С. О технологии доменной плавки при использовании пылеугольного топлива. *Металургія. Наукові праці ЗДІА*. 2009;(20):37–43.
Anosov V.G., Fomenko A.P., Krutas N.V., Tsaplina T.S. On technology of blast furnace melting using pulverized coal fuel. *Metallurgiya. Naukovi pratsi ZDIA*. 2009;(20):37–43. (In Ukr.).
11. Вегман Е.Ф., Жеребин Б.Н., Похвиснев А.Н., Юсфин Ю.С., Курунов И.Ф., Пареньков А.Е., Черноусов П.И. *Металлургия чугуна*. Москва: Академкнига; 2004:774.
12. Gorban A.N., Zinovyev A.Y. Principal graphs and manifolds. In: *Handbook of Research on Machine Learning Applications and Trends: Algorithms, Methods, and Techniques. Chapter 2*. Hershey, PA; 2009:28–59.
<https://doi.org/10.4018/978-1-60566-766-9.ch002>
13. Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Сидорова Т.Ю. Моделирование теплового состояния воздушных фурм доменных печей. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2016;59(9):622–627.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-9-622-627>
Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Sidorova T.Y. Modeling of the thermal state of air tuyeres of blast furnaces. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016;59(9):622–627. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-9-622-627>
14. Долинский В.А., Никитин Л.Д., Коверзин А.М., Портнов Л.В., Бугаев С.Ф. Использование промывочных брикетов для улучшения работы горна доменной печи. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2013;56(2):33–36.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2013-2-33-36>
- Dolinskii V.A., Nikitin L.D., Koverzin A.M., Portnov L.V., Bugaev S.F. Use of washing briquettes for improvement of the blast-furnace hearth operation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013;56(2):33–36. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2013-2-33-36>
15. Dai B., Long H.M., Ji Y.L., Rao J.T., Liu Y.C. Theoretical and practical research on relationship between blast air condition and hearth activity in large blast furnace. *Metallurgical Research and Technology*. 2020;117(1):113–117.
<https://doi.org/10.1051/etal/2020007>
16. Pototskiy E. P., Lazareva T. S. Investigation of factors affecting the safety of a blast furnace operation. *CIS Iron and Steel Review*. 2022;(1):15–18.
<https://doi.org/10.17580/cisisr.2022.01.03>
17. Song L., Xiaojie L., Qing L., Xusheng Z., Yana Q. Study on the appropriate production parameters of a gas-injection blast furnace. *High Temperature Materials and Processes*. 2020;39(1):10–25.
<https://doi.org/10.1515/htmp-2020-0005>
18. Левицкий И.А., Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Сидорова Т.Ю. Влияние способа подачи природного газа на газодинамику и теплообмен в воздушной фурме доменной печи. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2018;61(5):357–363.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-5-357-363>
Levitskii I.A., Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Sidorova T.Yu. Influence of the method of natural gas supplying on gas dynamics and heat transfer in air tuyere of blast furnace. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018;61(5):357–363. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-5-357-363>
19. Yasuo O. Blast Furnace Phenomena and Modelling. New York: Elsevier Applied Science; 1987:631.
20. Feng Q., Wang L. Blast furnace hoist charging control system based on ActiveX technology. *WIT Transactions on Information and Communication Technologies*. 2014;46:1853–858.

Сведения об авторах

Татьяна Сергеевна Стук, ведущий специалист по охране труда, аспирант кафедры техносферной безопасности, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
E-mail: lazareva.ts@misis.ru

Евгений Павлович Потоцкий, к.т.н., Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
E-mail: pep@disto.misis.ru

Поступила в редакцию 10.08.2023
После доработки 17.10.2023
Принята к публикации 11.12.2023

Information about the Authors

Tat'yana S. Stuk, Leading Specialist on Occupational Safety, Postgraduate of the Chair of Technosphere Safety, National University of Science and Technology "MISIS"
E-mail: lazareva.ts@misis.ru

Evgenii P. Pototskii, Cand. Sci. (Eng.), National University of Science and Technology "MISIS"
E-mail: pep@disto.misis.ru

Received 10.08.2023
Revised 17.10.2023
Accepted 11.12.2023