

Список литературы

1. Успенский В.А. Пневматический транспорт / В.А. Успенский – Свердловск, Металлургиздат, 1959.– 229с.
2. Страхович К.И. Основы теории и расчёта пневматических транспортных установок / К. И. Страхович – Москва : ОНТИ, 1934. – 112 с.
3. Зеглер Г. Транспортирование зерна пневматическим способом/ Г.Зеглер, П. Шредер. – Харьков: ГОНТИ, 1937. – 151 с.
4. Круглов А.Н. Пневматический транспорт зерна и его отходов / А.Н.Круглов – Москва :Заготиздат, 1944. – 127с.
5. Дорфман М.Х. Пневматический транспорт зерна и продуктов его переработки / М.Х.Дорфман – Москва: Хлебоиздат, 1960. – 222 с.
6. Бурсиан В.Р. Пневматический транспорт на предприятиях пищевой промышленности / В.Р.Бурсиан. – Москва: Пищепромиздат, 1960. – 217 с.
7. Урбан Я. Пневмотранспорт/Я.Урбан. – Москва :Машиностроение, 1967. – 256 с.
8. Зайцев А.Ф. Аэродинамические исследования отводов в системах пневмотранспорта измельченной древесины.: автореф. дис. на соиск. науч. степени канд.тех. наук./ А.Ф. Зайцев – Ленинград, 1970. – 24 с.
9. Зуев Ф.Г. Исследование сопротивлений отводов при пневматической транспортировании зерна и продуктов его переработки: дис. ... канд. тех. наук./ Ф. Г. Зуев. – Москва, 1961. – 200 с.
10. Репп К.Р. Исследование гидравлических сопротивлений колен и отводов при пневмотранспорте зерна и зернистых материалов: дис. ... канд. тех. наук./ К.Р.Репп.– Барнаул, 1971. –132 с.
11. Неборак И.Г. Исследование взаимодействия твердых частиц со стенками вертикального пневмотранспортёра: автореф. на соиск. науч. степени канд.тех. наук. / И. Г. Неборак. – Москва, 1971. – 27 с.
12. Коробов В.В. Пневматический транспорт и погрузка щепы / В.В. Коробов. – Москва :Лесная промышленность, 1974. – 176 с.
13. Дзязю А.М. Пневматический транспорт на зерноперерабатывающих предприятиях / А.М. Дзязю. – Москва :Заготиздат, 1961. – 327 с.
14. Калинушкин Н.П. Пневматический транспорт в строительстве / Н.П.Калинушкин, Е. З. Орловский, И.С. Сегаль. – Москва :Стройиздат, 1961.– 162 с.
15. Антоненко И.И. Пневмотранспортный трубопровод для сыпучих материалов /И. И. Антоненко, Н.Е. Новиков, А.В. Житков, В. И. Беспалов // А.С. 816912 (СССР). – Бюллетень изобретений. – 1981. – № 12. – С. 20.

Рукопись поступила в редакцию 18.04.2018

УДК 669.162.22-52

В.П. ЛЯЛЮК, д-р техн. наук, проф., Криворожский национальный университет
Д.А. КАССИМ, канд. техн. наук, доц., Криворожский металлургический институт

ПОВЫШЕНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДУТЬЯ И ГОРНОВОГО ГАЗА ПО ОКРУЖНОСТИ ГОРНА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Цель. Целью данной работы является определение влияния неравномерности расхода дутья по фурмам, а соответственно и теоретической температуры горения кокса перед фурмой, выхода горнового газа, полной энергии потока комбинированного дутья, отвечающей за размеры зон горения, и полной энергии потока горнового газа, отвечающей за глубину проникновения горнового газа к центру горна, на производительность доменной печи и удельный расход кокса в доменной плавке.

Методы исследования. Выполнены теоретические и эмпирические исследования, основанные на основных фундаментальных положениях теории доменной плавки с использованием при обработке результатов эмпирических исследований методов математической статистики. С целью определения влияния неравномерности распределения количественных и энергетических показателей дутьевого режима по фурмам доменной печи на производительность и удельный расход кокса использовали метод восстановления одномерных зависимостей.

Научная новизна. Получены результаты учета влияния коэффициентов вариации входящих дутьевых параметров при их изменении на 1% на производительность и удельный расход кокса, которые могут быть использованы при выполнении факторного анализа периодов работы доменных печей с различными значениями технологических параметров доменной плавки.

Практическая значимость. Теоретически обоснована актуальность и необходимость поиска и разработки технических решений, обеспечивающих равномерное распределение дутья с постоянной температурой по фурмам доменной печи.

Результаты. Выявлено наличие окружной неравномерности дутьевого режима в горне доменной печи. Установлена закономерность ее образования, развития и изменения под влиянием технологических и конструктивных факторов доменной плавки. Определено существенное влияние неравномерности дутьевых параметров работы доменной печи на расход кокса и производительность печи. Обоснована необходимость дальнейшего изучения процессов с выявлением глубинных причин образования окружной неравномерности распределения газового потока и разработки методов управления ими.

Ключевые слова: коэффициент вариации, неравномерность, распределение дутья, теоретическая температура, полная механическая энергия, выход горного газа, фурма.

© Лялюк В.П., Кассим Д.А., 2018

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. При освоении технологии ПУТ на доменной печи №9 объемом 5000 м³ ПАО “АрселорМиттал Кривой Рог” к сильно выраженной неравномерности распределения дутья по фурмам добавилось неравномерное распределение угольной пыли [1-3], что также привело к значительной неравномерности распределения по окружности горна печи теоретической температуры, выхода горнового газа, полных энергий потоков комбинированного дутья и горнового газа [4-6].

Все это значительно влияет на размеры зон горения, глубину проникновения газового потока к центру горна, изменение поля температур по радиусу и окружности горна, на форму и расположение зоны размягчения, на химический состав и физическое состояние материалов, на неравномерность схода шихты, на разгар профиля печи и т.д., что существенно сказывается на ровности хода доменной печи, ее производительности, удельном расходе кокса и качестве чугуна [7].

Анализ исследований и публикаций. Наблюдение за распределением дутья по фурмам, на доменной печи №9 комбината “Криворожсталь” начали сразу после ее задувки в 1974 году. Для количественной оценки неравномерности распределения дутья по фурмам определяли коэффициенты вариации (V_{σ}) расхода дутья по фурмам для каждого из периодов. Так за период с 1975 по июль 1983 года при работе доменной печи на 36 воздушных фурмах и засыпном аппарате клапанного типа конструкции ВНИИМетмаш-УЗТМ, коэффициент вариации изменялся в диапазоне $V_{\sigma}=17,5-70,4$ % (min-max), причем в июле 1983 года перед капитальным ремонтом первого разряда с реконструкцией – $V_{\sigma}=28,3-51,8$ %. В декабре 1983 года сразу после задувки печи на увеличенном количестве фурм (с 36 до 42) и установке на печи бесконусного загрузочного устройства фирмы “Поль Вюрт” коэффициент вариации несколько снизился до $V_{\sigma}=13,6-18,3$ %. Увеличение количества воздушных фурм и равномерное распределение шихтовых материалов на колошнике доменной печи бесконусным загрузочным аппаратом привело к относительному повышению равномерности распределения дутья по фурмам печи. В последующие периоды измерения расхода дутья по фурмам коэффициент вариации снова вырос и изменялся уже в диапазоне от 13,6 до 45,2 %.

На рис. 1-4 приведены диаграммы изменения расхода дутья, теоретической температуры, полной механической энергии потока комбинированного дутья по фурмам и полной механической энергии потока горнового газа перед фурмами доменной печи объемом 5000 м³. Сплошным кругом постоянного диаметра отображаются среднесуточные значения расхода дутья, теоретической температуры и полных энергий, а ломаные кривые с точками в узлах перед номером каждой фурмы отображают их фактические значения.

Анализ диаграмм показывает наличие большой неравномерности распределения расхода дутья по фурмам, теоретических температур и полных механических энергий по окружности и радиусу горна доменной печи. Значительную неравномерность распределения дутья по фурмам не удалось устранить ни установкой бесконусного засыпного аппарата, улучшившего распределение шихты по окружности доменной печи, ни увеличением количества воздушных фурм, повысивших равномерность распределения дутья по окружности печи, ни даже установкой фурм меньшего диаметра со стороны, противоположной сочленению прямого воздухопровода с кольцевым [8].

Следует отметить, что от увеличения числа воздушных фурм и не следовало ожидать значительного снижения неравномерности распределения дутья по фурмам, так как с ростом числа отводов воздуха от кольцевого воздухопровода эта неравномерность только увеличивается [9] и, вероятно, ее удалось несколько снизить, лишь благодаря улучшению распределения дутья в слое шихты по окружности печи и некоторому выравниванию гидравлического сопротивления столба шихты по окружности над каждой фурмой за счет использования бесконусного засыпного аппарата фирмы “Поль Вюрт”, у которого также имеется недостаток, связанный с невозможностью четкого замыкания колеи шихтовых материалов по окружности колошника доменной печи.

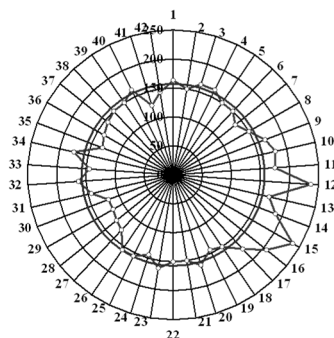


Рис. 1. Диаграмма изменения расхода дутья по фурмам печи объемом 5000 м^3 (цифры по радиусу диаграммы, $\text{м}^3/\text{мин.}$)

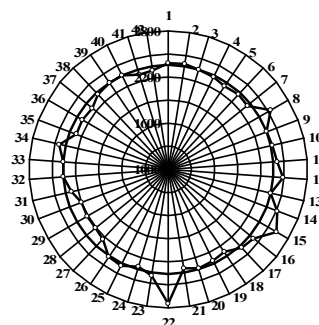


Рис. 2. Диаграмма изменения теоретической температуры по фурмам печи объемом 5000 м^3 (цифры по радиусу диаграммы, К)

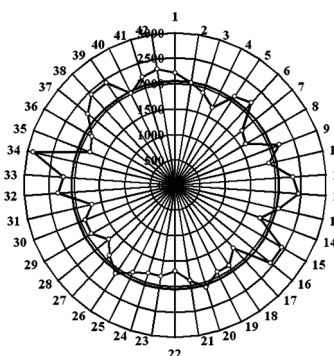


Рис. 3. Диаграмма изменения полной механической энергии комбинированного дутья по фурмам печи объемом 5000 м^3 (цифры по радиусу диаграммы, кДж/с)

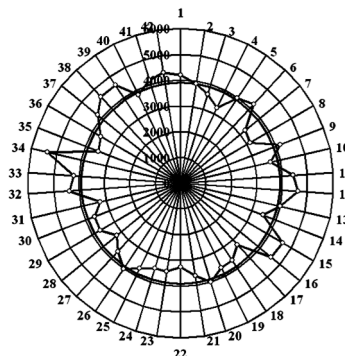


Рис. 4. Диаграмма изменения полной механической энергии потока горнового газа по фурмам печи объемом 5000 м^3 (цифры по радиусу диаграммы, кДж/с)

Постановка задачи. При сравнении разных периодов работы доменных печей с разными значениями технологических параметров доменной плавки выполняется пофакторный анализ для их сопоставления по производительности и удельному расходу кокса. При этом кроме коэффициентов приведения основных параметров известны и коэффициенты приведения позволяющие учесть также неравномерность состава шихты (влажность и зольность кокса, содержания железа в шихте и ее основность) и неравномерность параметров плавки (температуры, концентрации кислорода и влажности дутья, расхода природного газа) [10].

Цель данного исследования – определить влияние неравномерности расхода дутья по фурмам, теоретической температуры горения кокса перед фурмой, выхода горнового газа и полной энергии потока комбинированного дутья, отвечающей за размеры зон горения, и полной энергии потока горнового газа, отвечающей за глубину проникновения горнового газа к центру горна, на производительность доменной печи и удельный расход кокса в доменной плавке [5].

Изложение материала и результаты. Авторами работ [11-13] разработан метод математического моделирования технологического процесса – метод восстановления одномерных зависимостей (МВОЗ). Применение этого метода в металлургии чугуна позволяет на основании данных о среднесуточных значениях входных параметров и выходных показателей доменной плавки, фиксируемых в режиме нормальной эксплуатации, решать следующие задачи:

изучать фактические зависимости выходных показателей от каждого из входных параметров для конкретной доменной печи;

оценивать потенциальные резервы конкретной доменной печи по экономическим, энергетическим, ресурсным и экологическим показателям, которые могут быть реализованы за счет оптимизации технологического режима доменной плавки на существующем оборудовании, с использованием существующих систем информационного обеспечения и управления;

оптимизировать технологический режим доменной плавки и реализовать выявленные при технологическом аудите резервы производства.

С целью определения влияния неравномерности расхода дутья, теоретической температуры горения кокса перед фурмой доменной печи, выхода горнового газа, полных энергий потока

комбинированного дутья на срезе фурмы и потока горнового газа на производительность печи и удельный расход кокса воспользовались вышеназванным методом, с помощью которого осуществляется редукция к элементарным свойствам изучаемого процесса путем построения модели $Y=Fi(Xi)$, $i = 1, n$, которая описывает зависимость выходного показателя Y от каждого из n входных параметров X [11-13].

Анализ влияния неравномерности перечисленных параметров дутья и горнового газа на производительность и удельный расход кокса был выполнен по результатам работы доменной печи №9 объемом 5000 м³ комбината «Криворожсталь» в период ее работы с 1975 по 1985 годы, когда на печи регулярно осуществлялся контроль расхода дутья по воздушным фурмам (за 171 сутки), а в фурмы вдували природный газ.

На основании данных о расходе дутья по фурмам (Q_d) доменной печи были рассчитаны теоретическая температура горения (T_r), выход горнового газа (Q_{gr}) и энергетические параметры – полные механические энергии потока комбинированного дутья ($E_{пм\ кд}$) и горнового газа ($E_{пм\ гр}$). Для количественной оценки неравномерности распределения вышеперечисленных параметров по окружности горна доменной печи определили коэффициенты вариации (V_σ) за каждые из 171 рассмотренных суток работы печи. Исходные экспериментальные и расчетные данные для анализа сводились в таблицы (из-за их громоздкости они не приводятся) по методу МВОЗ [11-13].

В исследовании решалась задача определения влияния неравномерности каждого из параметров на суточную производительность доменной печи и удельный расхода кокса. В качестве входных показателей были использованы коэффициенты вариации расхода дутья [$V_\sigma(Q_d)$] по фурмам, полных механических энергий комбинированного дутья [$V_\sigma(E_{пм\ кд})$] и горнового газа [$V_\sigma(E_{пм\ гр})$], выхода горнового газа [$V_\sigma(Q_{gr})$], теоретической температуры горения [$V_\sigma(T_r)$]. В качестве выходных показателей приняты суточная производительность (Π) и удельный расход кокса (K). В соответствии с алгоритмом построения математической модели действующего технологического процесса [11-13] по экспериментальным данным было выполнено деление диапазонов вариации входных параметров на три поддиагона, с последующей сортировкой исходных данных по возрастанию каждого из входных параметров, определение средних значений входных и выходных параметров в каждом из трех диапазонов (D_j , $j=1,2,3$ см. табл. 1, 2).

Таблица 1

Расчет исходных данных для построения модели $\Pi = F(x_i)$

Входные параметры	Среднее значение входного параметра в поддиапазоне			Среднее значение выходного параметра в поддиапазоне		
	D ₁	D ₂	D ₃	D ₁	D ₂	D ₃
Q _d	19,27	27,87	45,4	11495	9570	8160
E _{пм кд}	22,23	32,66	55,39	9687	11325	9529
E _{пм гр}	21,47	31,47	52,37	9725	11242	9544
Q _{гр}	17,95	26,94	43,17	9775	11182	9556
T _r	12,48	30,71	49,47	9717	11227	9567

В результате были восстановлены следующие аналитические зависимости между производительностью и приведенными входными параметрами

$$\Pi = -120,69 \cdot V_\sigma(Q_d) + 13464 \quad k = -0,96; \quad (1)$$

$$\Pi = -7,1189 \cdot [V_\sigma(E_{пм\ кд})]^2 + 547,8 \cdot V_\sigma(E_{пм\ кд}) + 1027,3 \quad \eta = 0,40; \quad (2)$$

$$\Pi = -7,5386 \cdot [V_\sigma(E_{пм\ гр})]^2 + 550,8 \cdot V_\sigma(E_{пм\ гр}) + 1374,4 \quad \eta = 0,34; \quad (3)$$

$$\Pi = -10,178 \cdot [V_\sigma(Q_{gr})]^2 + 613,4 \cdot V_\sigma(Q_{gr}) + 2043,8 \quad \eta = 0,24; \quad (4)$$

$$\Pi = -4,6314 \cdot [V_\sigma(T_r)]^2 + 282,86 \cdot V_\sigma(T_r) + 6908,2 \quad \eta = 0,51. \quad (5)$$

Значимость и адекватность моделей была проверена по F-критерию Фишера. Для уравнения (1) фактическое значение F-критерия 7,01 больше табличного 1,97, что свидетельствует о статистической значимости уравнения в целом. Показатель надежности $\mu = 160$, при коэффициенте корреляции -0,96, так же показывает, что связь между производительностью и неравномерностью распределения дутья по фурмам является статистически достоверной и уравнение (1) может быть использовано для анализа и прогноза эффективности доменной плавки [14].

Выполненный анализ также позволил установить, что при снижении неравномерности (коэффициента вариации) расхода дутья по фурмам доменной печи на 1 % в диапазоне от 45,4 до 19,27 % (табл. 1) производительность печи увеличивается с 8160 до 11495 т/сут., т.е. на 1,1 %.

Связи между производительностью и остальными входными параметрами лучше аппроксимируются полиномиальными моделями 2-го порядка (2-5). В данном случае оценку тесноты связи выполняли по величине корреляционного отношения η , а значимость и адекватность моделей проверяли по F-критерию Фишера.

Для связи между производительностью и коэффициентом вариации полной энергии потока комбинированного дутья корреляционное отношение составило 0,4, что говорит о наличии умеренной взаимосвязи рассматриваемых параметров. Фактическое значение F-критерия уравнения (2) составило 24,07, что больше табличного, следовательно, это уравнение в целом статистически значимо. Расчеты показали, что при снижении неравномерности полной энергии потока комбинированного дутья с 55,39 до 32,66 %, производительность доменной печи растет с 9529 до 11325 т/сут, т.е. на 1 % снижения неравномерности энергии потока комбинированного дутья производительность печи увеличивается на 0,7 %.

Величина корреляционного отношения для связи между производительностью и коэффициентом вариации полной механической энергией потока горнового газа (уравнение 3) составила 0,34, что также говорит об умеренной зависимости между параметрами. Значение F-критерия 16,9 позволило использовать уравнение при анализе, который показал, что на каждый 1 % уменьшения неравномерности полной механической энергии горнового газа с 52,37 до 31,47 % производительность печи увеличивается с 9544 до 11242 т/сут., т.е. на 0,72 %.

Слабая теснота связи получена для производительности и неравномерности (коэффициента вариации) выхода горнового газа (уравнение 4, $\eta = 0,24$), однако значение F-критерия 9,6 позволяет использовать полученную модель для анализа технологии доменной плавки. При уменьшении неравномерности выхода горнового газа с 43,17 до 26,94 % производительность печи увеличивается с 9556 до 11182 т/сут., т.е. на 0,89 % на каждый 1 % $V_{\sigma}(Q_{гг})$.

Более высокая теснота связи характерна для неравномерности теоретической температуры горения и производительности (уравнение 5, $\eta = 0,51$). Высокое значение F-критерия 34,5 говорит о том, что данная модель может быть использована для принятия решений и осуществления прогнозов. Получено, что при уменьшении $V_{\sigma}(T_{гг})$ с 49,47 до 30,71 % производительность печи увеличивается с 9567 до 11227 т/сут., т.е. на 0,79 % на каждый 1 % коэффициента вариации теоретической температуры. Таким образом, снижение неравномерности всех рассмотренных параметров дутьевого режима по окружности горна доменной печи приводит к увеличению ее производительности.

Аналогичным образом, за тот же период исследований контроля расхода дутья по фурмам доменной печи №9, был выполнен анализ влияния неравномерности перечисленных параметров на удельный расход кокса по методу МВОЗ [11-13].

Результаты определения средних значений входных параметров и удельного расхода кокса в каждом из трех поддиапазонов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчет исходных данных для построения модели $K=F(x_i)$

Входные параметры	Среднее значение входного параметра в поддиапазоне			Среднее значение выходного параметра в поддиапазоне		
	D ₁	D ₂	D ₃	D ₁	D ₂	D ₃
Q _д	19,27	27,87	45,4	480,8	497,3	506,1
E _{пм кд}	22,23	32,66	55,39	481,6	497,1	505,4
Q _{гг}	21,47	31,47	52,37	482,8	495,9	505,4
T _г	17,95	26,94	43,17	488,9	494,9	500,4
E _{пм гг}	12,48	30,71	49,47	481,2	498	505,1

Обращает на себя внимание тот факт, что даже при первичном анализе видно, что минимальный расход кокса соответствует диапазонам с минимальным коэффициентом вариации всех изучаемых показателей.

Все взаимосвязи были аппроксимированы линейными уравнениями (6)-(10)

$$K = 0,8996 \cdot V_{\sigma}(Q_{д}) + 466,98 \quad k = 0,93; \quad (6)$$

$$K = 0,6606 \cdot V_{\sigma}(E_{\text{пм кд}}) + 470,42 \quad k = 0,93; \quad (7)$$

$$K = 0,6448 \cdot V_{\sigma}(E_{\text{пм гт}}) + 474,85 \quad k = 0,97; \quad (8)$$

$$K = 0,6448 \cdot V_{\sigma}(Q_{\text{гт}}) + 470,51 \quad k = 0,96; \quad (9)$$

$$K = 0,4419 \cdot V_{\sigma}(T_{\text{т}}) + 481,76 \quad k = 0,98. \quad (10)$$

Высокие значения коэффициентов корреляции говорят об очень сильной прямо пропорциональной взаимосвязи расхода кокса с неравномерностью параметров дутьевого режима. Значимость и адекватность моделей также была проверена по F-критерию Фишера. Для всех уравнений фактическое значение данного критерия выше табличного ($F_6 = 16,5$; $F_7 = 15,2$; $F_8 = 12,4$; $F_9 = 9,3$; $F_{10} = 10,9$), что свидетельствует о статистической значимости уравнений в целом. Оценка надежности полученных результатов также была выполнена при помощи критерия надежности μ [14]. Показатели надежности $\mu_6 = 90,0$, $\mu_7 = 90,0$, $\mu_8 = 214,6$, $\mu_9 = 160,1$, $\mu_{10} = 323,6$. Выполненный анализ подтвердил тесную взаимосвязь удельного расхода кокса и коэффициентов вариации параметров дутьевого режима.

Результаты учета влияния неравномерности входных показателей при их изменении на каждый 1 % на производительность и удельный расход кокса приведены в табл. 3.

Таблица 3
Влияние неравномерности технологических факторов на производительность и удельный расход кокса

Уменьшение неравномерности на 1 %	Производительность, %	Удельный расход кокса, кг/т
$Q_{\text{д}}$	+1,10	-0,97
$E_{\text{пм кд}}$	+0,70	-0,72
$E_{\text{пм гт}}$	+0,72	-0,65
$Q_{\text{гт}}$	+0,89	-0,73
$T_{\text{т}}$	+0,79	-0,46

Проведенный анализ показал, что наибольшее влияние на производительность доменной печи и удельный расход кокса оказывает, прежде всего, неравномерность расхода дутья по фурмам по окружности горна доменной печи.

Для дальнейшего анализа из исходных данных контроля расхода дутья по фурмам доменной печи №9

выбрали измерения с самым минимальным коэффициентом вариации и, предполагая постоянство температуры дутья на каждой фурме, попытались расчетным путем добиться одновременного устранения неравномерности теоретической температуры, выхода горнового газа, полной энергии потока комбинированного дутья и полной энергии потока горнового газа, путем регулирования расходов кислорода, природного газа или пара, а также дополнительного изменения температуры природного газа (подогрев) и температуры пара, путем подачи их непосредственно в каждую фурму (конструкции таких фурм с одновременной подачей природного газа и кислорода хорошо известны, а вместо природного газа можно подавать в фурму и пар [15]). Даже в этом случае получить одновременно минимальные коэффициенты вариации, т.е. снизить неравномерность по теоретической температуре, выходу горнового газа и двум полным энергиям при любых вариантах изменения расходов природного газа, кислорода и пара, изменения температуры природного газа и температуры пара, путем подачи их непосредственно в каждую фурму не представляется возможным. Однако, если выровнять расход дутья на каждую фурму и принять при этом постоянство температуры дутья на каждой фурме, то задача обеспечения равномерности остальных четырех показателей дутьевого потока перед каждой фурмой легко решается путем незначительной регулировки расходов кислорода, природного газа или пара подаваемых непосредственно в фурму. При этом коэффициенты вариации рассматриваемых параметров сразу снижаются до приемлемого уровня 0,46-2,1.

Несмотря на известный опыт и сложности осуществления автоматического контроля и регулирования расхода дутья по фурмам, реализация такой системы с контролем температуры дутья на каждой фурме, является весьма перспективной. Это позволит оперативно контролировать изменения перед каждой фурмой и обеспечить постоянство теоретической температуры, выхода горнового газа, полных энергий потоков дутья и горнового газа по окружности доменной печи, а также оптимизировать газодинамику и тепловой режим доменной плавки и выйти на согласованное управление параметрами загрузки и дутья.

Выводы и направление дальнейших исследований. В работе получены математические модели взаимосвязей входных и выходных параметров доменной плавки, позволившие определить степень влияния неравномерности входных показателей при их изменении на каждый 1 % на производительность и удельный расход кокса. Проведенный анализ показал, что наибольшее влияние на производительность доменной печи и удельный расход кокса оказывает, прежде

всього, неравномерность расхода дутья по фурмам по окружности горна доменной печи.

Для полного решения обозначенной в данной работе задачи необходимо обеспечить равномерное распределение дутья с постоянной температурой по фурмам доменной печи, что из-за неэффективной конструкции смесителя холодного дутья с горячим сделать пока невозможно. Поэтому вопрос разработки конструкции эффективного смесителя не снят и требует дальнейших исследований.

Список литературы

1. **Лялюк В.П.** Методика расчета полной энергии горнового газа при вдувании пылеугольного топлива / **В.П. Лялюк, А.К. Тараканов, Д.А. Кассим** // Сталь. – 2017. – №3. – С. 2-8.
2. Определение траектории потока газа при вдувании в доменную печь пылеугольного топлива / **В.П. Лялюк, А.К. Тараканов, Д.А. Кассим** и др. // Сталь. – 2017. – №4. – С. 2-6.
3. Проблемы технологии с вдуванием пылеугольного топлива на доменной печи объемом 5000 м³ / **В.П. Лялюк, А.К. Тараканов, Д.А. Кассим** и др. // Сталь. 2017. – №10. – С. 4-10.
4. **Лялюк В.П.** Современные проблемы технологии доменной плавки: монография / **В.П. Лялюк** – Днепропетровск: Пороги, 1999. – 164 с.
5. **Лялюк В.П.** Выбор режимов доменной плавки на комбинированном дутье с оценкой параметров фурменной зоны / **В.П. Лялюк, И.Г. Товаровский** // Черные металлы. 2003. – №11. – С. 13-16.
6. Теоретические и экспериментальные исследования доменной плавки / **Лялюк В.П., Кассим Д.А., Онопа В.Н., Донсков Е.Е.** – Кривой Рог: Дионат, 2016. – 621 с.
7. Влияние распределения дутья по фурмам на газовый поток в доменной печи / **Бугаев К.М., Антонов В.М., Варшавский Г.В.** и др. // Сталь. – 1987. – №2. – С. 17-22.
8. Влияние диаметра воздушных фурм на работу доменной печи объемом 5000 м³ / **Почекайло И.Е., Тарановский В.В., Петухов В.Н.** и др. // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 1988. – №2. – С. 6-8.
9. **Иванов Ю.В.** Газогорелочные устройства / **Ю.В. Иванов** – М.: Недра, 1972. – 276 с.
10. **Товаровский И.Г.** Эволюция доменной плавки / **И.Г. Товаровский, В.П. Лялюк** // Днепропетровск: Пороги, 2001. – 424 с.
11. **Давиденко А.М.** Новые методы изучения действующих производств и их возможности / **А.М. Давиденко, М.Д. Кац** // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2004. – №6. – С.189-193.
12. **Кац М.Д.** Математическое моделирование и оптимизация технологического режима доменной плавки по информации, фиксируемой в режиме нормальной эксплуатации / **М.Д. Кац, А.М. Давиденко** // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – №3. – С. 15-20.
13. **Грачев Ю.М.** Новый подход к решению задачи повышения эффективности доменной плавки одновременно по удельному расходу кокса и производительности / **Ю.М. Грачев, М.Д. Кац, А.М. Давиденко** // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2008. – №5. – С. 142-145.
14. **Коробов В.И.** Статистические исследования доменного процесса / **В.И. Коробов** – М.: Metallургия, 1977. – 184 с.
15. Об увлажнении дутья в доменной плавке / **Лялюк В.П., Тараканов А.К., Кассим Д.А.** и др. // Сталь. – 2017. – №8. – С. 7-12.

Рукопись поступила в редакцию 06.02.2018

УДК 622.235:622.271

А.А. СКАЧКОВ, «ГДД МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГ»

ГЕОМЕХАНІЧНИЙ АНАЛІЗ МЕЖ МОЖЛИВОГО ЗАСТОСУВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ УКОСІВ УСТУПІВ ДЛЯ СИМЕТРИЧНОГО ЇХ ПІДРИВАННЯ

У статті аналізуються геомеханічні умови, за яких вибухове руйнування кристалічних порід здійснюється за допомогою взаємодії свердловинних зарядів. Це враховує суперпозицію вибухових хвиль, що розходяться від різних рядів свердловин і відбиваються від поверхонь уступів. Крім того, розроблений автором метод відрізняється від традиційних тим, що укоси вибухових блоків формуються не похилими – а вертикальними. Застосування вертикальних (субвертикальних) укосів спонукало автора провести також дослідження можливих геомеханічних ризиків розробленого рішення, що було виконано графоаналітичним методом.

Мета. Основною метою дослідження є визначення геомеханічних факторів, що впливають на стійкість породних уступів з вертикальними укосами. Присвячене воно вирішенню актуального питання зниження питомої витрати вибухових речовин на руйнування гірських порід шляхом зміни порядку виконання вибухових робіт. Це враховує напружено-деформований стан гірського масиву при руйнуванні його в умовах симетричного підривання.

Методами дослідження є аналіз геологічних даних по залізрудних родовищ Кривбасу, проектної документації, даних виробничої діяльності гірничих підприємств і кар'єрів, наукових публікацій, їх подальший аналіз і обґрунтування розроблених положень.