

Исследование взаимовлияния верхней и нижней зон доменной печи

Приведены параметры нижней и верхней зон доменной печи. Получены стохастические модели параметров. Определена связь между ними. Произведена оптимизация параметров верхней и нижней зон. Даны рекомендации по улучшению технико-экономических показателей доменной плавки.

Ключевые слова: параметры доменной плавки, математические модели, оптимизация, рекомендации

Постановка проблемы. Высокопроизводительная и экономичная работа доменной печи зависит от того, как организовано распределение шихты и газа во всем объеме рабочего пространства. Движение и распределение шихты и газа определяется выбором системы загрузки (управление сверху) и параметрами дутья (управление снизу). Чаще всего управляют работой доменной печи, загрузкой и распределением шихтовых материалов сверху, но определенное распределение газового потока снизу тоже значительно влияет на рациональное распределение шихты и газа во всем объеме печи. Поэтому исследование взаимовлияния параметров низа и верха печи играет особенную роль в достижении рационального режима доменной плавки.

Анализ последних исследований и публикаций. Специалисты доменного производства понимали на интуитивном уровне связь верхней и нижней зон доменной печи, но выбирали соответствующие параметры методом проб и ошибок, а конечные результаты не всегда соответствовали лучшим значениям взаимосвязанным параметрам низа и верха печи [1].

Издавна доменщики уделяют большое внимание вопросу – в какой мере зависят друг от друга верхняя и нижняя зоны, а именно как целесообразно выбрать систему загрузки при определенных параметрах зоны циркуляции, поскольку распределение газового потока в нижней и верхней зоне в значительной мере оказывают взаимное влияние друг на друга, но, как правило, с целью упрощения расчетов автора [2] предлагают ввести понятие «относительной» автономности газодинамики верхней и нижней зон, что уже предусматривает наличие неточностей. Авторами [3, 4] также были допущены неточности в работах посвященной данной проблеме, а именно исключено воздействие распределения шихты на колошнике, фактор, который оказывает значительное влияние на взаимораспределение газового потока во всем объеме доменной печи, что также не позволяет в полной мере опираться на полученные результаты.

Таким образом, известно на качественном уровне, что газораспределение в верхней зоне доменной печи должно соответствовать газораспределению в нижней зоне. Однако в какой количественной

мере связаны распределение шихты на колошнике и газового потока в горне в технической литературе сведений нет.

Постановка задачи. В связи с этим актуальна проблема усовершенствования методов управления плавкой на основе оптимизации работы верхней и нижней зон доменной печи, так как решение этой задачи предопределяет резервы увеличения производительности доменной печи, экономии энергоресурсов и снижение себестоимости чугуна.

Изложение основного материала исследования. Экономичное распределение газового потока в верхней зоне доменной печи определяется в основном параметрами загрузки шихты: системой загрузки, качеством шихты и компонентным ее составом. Этими рычагами пользуется мастер печи с целью рационально подгрузить железорудной шихтой газовый поток, который формируется и в нижней зоне доменной печи.

Распределение же газового потока в нижней зоне доменной печи зависит от многих факторов: параметров фурм и дутья, качества кокса, которые входят составной частью в размеры зон горения и циркуляции. Последние и определяют газораспределение, которое доменщики пытаются привести в соответствие путём подгрузки железорудной шихтой тот или иной участок радиуса колошника, чтобы оптимизировать газодинамический режим, ход печи и, в конечном счете, расход кокса и производительность в доменной плавке.

Предварительный анализ показал, что теоретическое решение проблемы взаимовлияния распределения газовых потоков верхней и нижней зон доменной печи может быть решено путём создания математических моделей движения газа в нижней и верхней зонах доменной печи, причем модель верхней зоны строится на основе факторов загрузки, а нижней зоны – кинетической энергии горновых газов и перепада давлений.

Размеры зоны циркуляции рассчитаны при помощи созданной детерминированной математической модели, исходя из принципа Даламбера – равенства опорной силы горновых газов $F_{гр}$, раздвигающих шихту в доменной печи и силы давления (веса) шихты на зону горения F_B силам инерции [5]:

$$m \, d^2L / dt^2 = F_B - F_{гр} \quad (1)$$

Расшифровав силы и дважды проинтегрировав, получим длину циркуляционной зоны, которая выглядит следующим образом:

$$L = 2,2 \cdot d_{\phi} + 1,453 \left(\left(Q_g^2 K_3^2 / n^2 - \frac{K_{yd} \Pi Q_g K_3}{86400 V_k n} \right) / \left(g - \frac{3 \Delta P_H}{K_{эл}^{0,667} \rho_{ш} L_H} \right) \right)^{0,2} \quad (2)$$

где d_{ϕ} – диаметр фурмы, м; Q_g – количество горнового газа, м³/с; K_3 – скорость запаздывания циркуляции кокса относительно скорости газового потока; n – количество фурм; K_{yd} – удельный расход кокса, кг/т; Π – производительность печи, т/сут; V_k – насыпная масса кокса, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; ΔP_H – нижний перепад давлений, Па; $K_{эл}$ – соотношение эллипсоида разрыхления и зоны циркуляции; $\rho_{ш}$ – насыпная масса шихты (кокса и агломерата), кг/м³; L_H – расстояние от верха до датчика нижнего перепада давлений, м.

В данной модели присутствуют все параметры нижней зоны доменной печи. Расчет зоны циркуляции производился по производственным среднемесячным данным доменной печи № 3 ОАО «Запорожсталь».

Выяснение количественной связи газораспределения в нижней и верхней зонах позволит разработать рекомендации по комплексной оптимизации использования газового потока с учётом регулирующих мер в верхней и нижней зонах доменной печи, что приведёт к оптимальному сочетанию режимов загрузки и дутья, стабилизации хода печи и, в конечном счете, к улучшению технико-экономических показателей доменной плавки – снижению расхода кокса без существенной потери производства чугуна.

Для определения реального взаимовлияния распределения газового потока верхней и нижней зон доменной печи были проведены статистические исследования на доменной печи № 3 металлургического комбината «Запорожсталь». Было исследовано влияние расположения зоны циркуляции на использование газового потока на колошнике доменной печи. Из рис. 1 видно, что с увеличением длины зоны циркуляции до 1,75 м общее использование газового потока и монооксида углерода увеличивается до максимальных пределов, при этом система загрузки должна быть 80 % прямых подач, максимальная по массе подача – 22,0-22,5 т при уровне засыпи 1,5 м.

Степень использования водорода наоборот – с уменьшением длины циркуляционной зоны – увеличивается. Длина зоны в этом случае должна быть на уровне 1,68 м. Это объясняется тем, что водород природного газа в основном имеет тенденцию двигаться по периферии печи из-за плохого перемешивания с потоком дутья.

Поскольку положение центра циркуляционной зоны определяет максимум газового потока,двигающегося вверх, то изменение длины зоны по радиусу горна определяет основной поток, который должен быть загружен шихтой на колошнике.

На рис. 2 показано взаимовлияние факторов загрузки и распределения газового потока снизу, которое определяет длину зоны циркуляции. Из графиков вид-

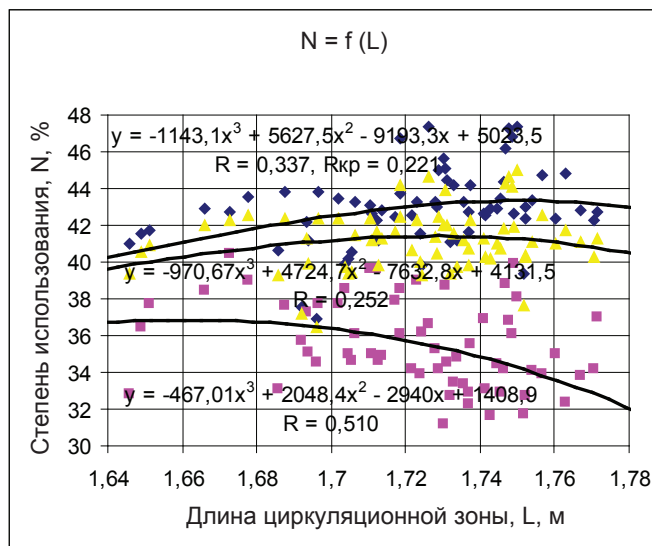


Рис. 1. Влияние длины зоны циркуляции на степень использования газового потока: общую $N_{\Sigma} = (CO_2 + H_2O) \cdot 100 / (CO_2 + CO + H_2O + H_2)$ – верхняя кривая; монооксида углерода $N_{CO} = CO_2 \cdot 100 / (CO + CO_2)$ – средняя и водорода $N_{H_2} = H_2O \cdot 100 / (H_2O + H_2)$ – нижняя кривая

но, что с увеличением протяженности зоны циркуляции в горне от 1,7 м и более, на колошнике необходимо применять систему загрузки, позволяющую подгружать как периферию (количество прямых подач около 80% и уровень засыпи более 1,5 м), так и промежуточную часть радиуса (масса подачи 22 и более тонн).

Для нижнего распределения газового потока, соответствующего меньшим длинам циркуляционных зон, более подходит количество нормальных подач от 40 до 70% и уровень засыпи 1-1,5 м, что позволяет более равномерно распределить железорудную часть подачи по радиусу колошника, не перегружая периферии, и разгрузить центр печи, применяя массу подачи 19-21 т.

Из рисунков 1 и 2 видно, что параметры нижней и верхней зон достаточно сильно взаимосвязаны, поскольку имеют коэффициенты корреляции 0,337-0,689 при критическом коэффициенте 0,221 и показателе надёжности 2,96.

Таким образом, если наложить на начальное распределение газового потока в нижней зоне распределение газа в верхней зоне, обусловленное системой загрузки, то можно математическим путем подобрать оптимальные параметры нижней и верхней зон. Такое возможно, когда имеются математические модели газораспределения в нижней и верхней зонах.

Поэтому нами предпринята попытка эмпирико-теоретического нахождения совместных оптимальных параметров нижней и верхней зон доменной печи.

С целью оптимизации взаимовлияния распределения газового потока верхней и нижней зон и дальнейшего выбора более рационального использования внутреннего резерва доменной печи, было выполнено на основе проведенных статистических исследований на доменной печи № 3 металлургического комбината «Запорожсталь», и было исследовано влияние расположения зон циркуляции и факторов загрузки на использование газового потока и верхний перепад давлений на колошнике доменной печи.

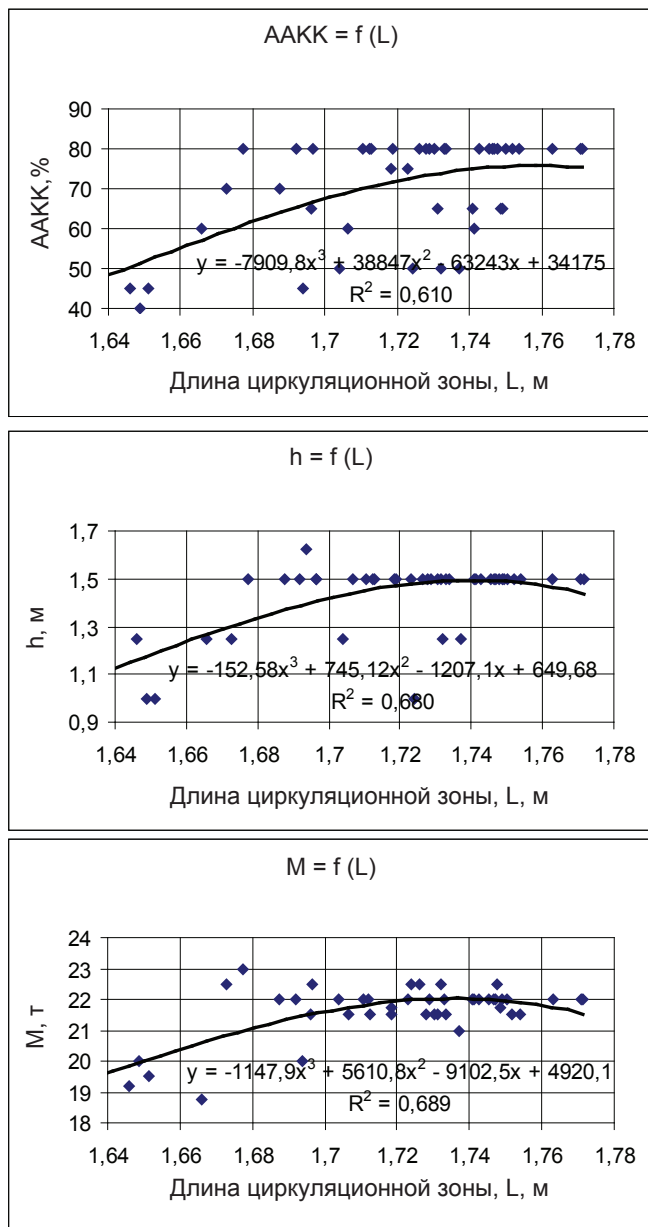


Рис. 2. Взаимовлияние факторов загрузки (AAKK, %; M, т; h, м) и длины зоны циркуляции (L, м)

Исследование проводилось на основе математического моделирования путем построения квадратичных моделей потерь давления и использования газового потока, в которых фигурировали в качестве факторов режим загрузки и длина зоны циркуляции. Проверка адекватности полученных моделей проводилась по критерию Фишера [6], расчетное значение которого составило $F_p = 2,53$, что меньше табличного $F_T = 2,81$, следовательно модель адекватна. Исходя из полученных результатов, получили уравнения:

$$\begin{aligned} \Delta P_B = & -15,352 - 0,656 M + 4,431 h + 24,351 L + \\ & + 0,022 M^2 - 0,239 h^2 - 7,722 L^2 - 0,003 \sigma M + \\ & + 0,041 \sigma L - 2,197 h L \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} N_{\infty} = & 236,233 - 0,709 \sigma - 17,595 M - 193,949 h + \\ & + 143,403 L - 0,002 \sigma^2 + 0,357 M^2 - 82,3 L^2 + \\ & + 0,049 \sigma M + 114,36 h L, \end{aligned} \quad (4)$$

где σ – процент прямых подач в системе загрузки, %; M – масса подачи, т; h – уровень засыпи, м; L – длина зоны циркуляции, м.

Метод оптимизации выбирали исходя из того, что металлургическое производство, как правило, многокритериально, поэтому при выборе наилучшего варианта технологии приходится учитывать большое количество различных требований, среди которых встречаются противоречащие друг другу. В этом случае необходимо применять методы оптимизации с технологическими ограничениями или компромиссные. Один из таких методов, который использовался для оптимизации – метод неопределенных множителей Лагранжа [7].

Составили функцию Лагранжа из уравнений (3) и (4):

$$\begin{aligned} \Phi_n = & -15,352 - 0,656 M + 4,431 h + 24,351 L + \\ & + 0,022 M^2 - 0,239 h^2 - 7,722 L^2 - 0,003 \sigma M + \\ & + 0,041 \sigma L - 2,197 h L + \lambda (236,233 - \\ & - 0,709 \sigma - 17,595 M - 193,949 h + \\ & + 143,403 L - 0,002 \sigma^2 + 0,357 M^2 - \\ & - 82,3 L^2 + 0,049 \sigma M + 114,36 h L) \end{aligned} \quad (5)$$

здесь λ – неопределённый множитель Лагранжа.

Взяли частные производные от функции Лагранжа по каждому фактору и приравняли их к нулю, поскольку экстремум функции находится в точке, где производная равна нулю.

Ограничили экстремальные значения функции Лагранжа необходимой величиной перепада давления 0,375 ат, так как это значение немного выше обычного, но еще не очень близко к критическому, при которых происходят отрицательные явления в печи:

$$\begin{aligned} \Delta P_B = & -15,352 - 0,656 M + 4,431 h + 24,351 L + \\ & + 0,022 M^2 - 0,239 h^2 - 7,722 L^2 - 0,003 \sigma M + \\ & + 0,041 \sigma L - 2,197 h L = 0,375 \end{aligned}$$

Методом матриц при помощи Mathcad вычислили оптимальные значения факторов интерационным методом и получили следующие значения факторов верха и низа печи: $\sigma = 86,8 \%$; $M = 19,7 \text{ т}$; $h = 1,58 \text{ м}$; $L = 1,69 \text{ м}$.

С целью определения эффективности разработанных рекомендаций, выбрали среднемесячный период работы доменной печи с максимально приближенными параметрами к рекомендованным и сравнили расходы кокса и производительности, со средними условиями работы печи, с нивелировкой путем пересчета на одинаковые технологические условия по общепринятым коэффициентам [8].

Судя по результатам сравнения оптимального и сравнительного периода, необходимо отметить что, рекомендуемые условия ведения печи дают значимый результат (см. таблицу), а именно снижение расхода кокса на 6,56 % и увеличение производительности на 7,92 %. При реализации данных рекомендаций принимается коэффициент внедрения и влияния неучтенных факторов 0,5; следовательно снижение расхода кокса на $6,56 \cdot 0,5 \sim 3,5 \%$, увеличения производительности на $7,92 \cdot 0,5 \sim 4 \%$.

Технико-экономические показатели	Периоды	
	Сравнительный	Опытный
Производительность, т/сут	2 597,58	3 031,00/2 820,95
Расход шихты, кг/т: кокса сух,	493,65	450,00/463,28
агломерата	1 534,73	1 489,00
окатышей	226,38	297,00
известняка	33,00	13(-1)(+1)
Содержание железа в шихте, %	55,77	56,26(-0,9) (+0,49)
Параметры дутья: кол-во, м /мин	2 728,69	2 776,00
температура, °С	1 143,88	1140 (+0,11) (-0,11)
природный газ, м ³ /т	105,38	119 (+0,19)
кислород, %	23,87	25,1 (-2,94) (-0,25)
влажность, г/м	9,25	7,9 (-0,2) (+0,13)
Анализ чугуна, %: кремний	0,70	0,73 (+0,01) (-0,01)
марганец	0,32	0,28 (-0,01) (+0,01)
сера	0,02	0,02(0)
Параметры шлака: количество, кг/т	450,92	417 (-1,2) (+1,2)
основность	1,23	1,20
Параметры колошникового газа: состав, %: CO ₂	17,92	19,90
СО	23,60	22,20
100·CO ₂ /(CO+CO ₂)	43,18	47,27
Н ₂	7,61	8,90
температура, °С	352,77	317,00
давление, ат	1,31	1,4
нижний перепад давлений, кПа	0,92	0,93
общий перепад давлений, ат	1,27	1,21
Система загрузки: масса подачи, т	22,01	22,5
количество нормальных подач, %	72,88	80,00
уровень засыпи, м	1,4	1,50
Остановки, %	0,98	0,64 (-0,5) (+0,17)
Тихий ход, %	0,93	0,62 (-0,31) (+0,16)
Качество агломерата, фр. 0-5 мм, %	14,64	14,6 (-0,08) (+0,06)
Качество кокса, % : M ₂₅	86,94	86,6 (+0,21) (-0,21)
M ₁₀	7,78	7,7 (+0,22) (-0,22)
сера	1,15	1,03 (-0,03) (+0,03)
зола	2 114,23	11,4 (-0,31) (+0,31)
Теоретическая температура горения, T _{тг} , °С		2 074,48
Длина зоны циркуляции	1 ,61	1 ,68

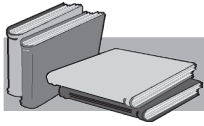
Выводы

В результате математического моделирования обнаружена тесная количественная связь между параметрами нижней и верхней зон доменной печи.

Получены математические модели стохастического типа связи параметров нижней и верхней зон доменной печи.

Для оптимизации полученных моделей применен метод неопределённых множителей Лагранжа.

Применение рекомендованных результатов на доменной печи позволило улучшить технико-экономические показатели доменной плавки.



ЛИТЕРАТУРА

1. Жеребин Б. Н. Практика ведения доменных печей. – М.: Metallurgy, 1980. – 248 с.
2. Ковшов В. Н. Интенсификация доменного процесса с использованием математических моделей загрузки и газодинамики верхней зоны печи. Дисс. На соиск. докт. техн. наук. – Днепропетровск: ДМетИ, 1992. – 360 с.
3. Теплотехника доменного процесса / Б. И. Китаев, Ю. Г. Ярошенко, Е. Л. Суханов и др. // М.: Metallurgy, 1978. – 248 с.
4. Лялюк В. П. Современные проблемы технологии доменной плавки. – Днепропетровск: Пороги, 1999. – 164 с.
5. О возможности математического описания распределения газа в доменной печи с целью экономии топлива / В. Н. Ковшов, В. В. Бочка, Е. И. Сулименко, В. А. Петренко // Metall and Casting of Ukraine, 2006. – № 5. – С. 17-20.
6. Ковшов В. Н., Петренко В. А., Верещак В. И. Моделирование доменного процесса. – Днепропетровск: Институт технологии, 1997. – 109 с.
7. Ковшов В. Н., Петренко В. А., Верещак В. И. Оптимизация доменного процесса. – Днепропетровск: Арт-Пресс, 1997. – 108 с.
8. Волков Ю. П., Шпарбер Л. Я., Гусаров А. К. Технолог-доменщик. Справочное и методическое пособие. – М.: Metallurgy, 1986. – 263 с.

Анотація

Ковшов В. М., Петренко В. О., Усенко В. А., Кривонос С. А.
Дослідження взаємовпливу верхньої і нижньої зон доменної печі

Надано параметри нижньої і верхньої зон доменної печі. Отримано стохастичні моделі параметрів. Визначено зв'язок між ними. Виконана оптимізація параметрів верхньої і нижньої зон. Дані рекомендації з покращення техніко-економічних показників доменної плавки.

Ключові слова

параметри доменної плавки, математичні моделі, оптимізація, рекомендації

Summary

Kovshov V. N., Petrenko V. A., Usenko V. A., Krivonosov S. A.
Study of the mutual influence of the upper and lower zones of the blast furnace

In this article was gave lists the parameters of the lower and upper zones of the blast furnace. Stochastic model parameters were received and defined the link between them. The optimization of parameters of the upper and lower zones was done. Recommendations on the improvement of technical and economic indices of blast-furnace production were written here.

Keywords

options for blast-furnace production, mathematical models and optimization, recommendations

Поступила 09.04.14