

УДК 669.162

Федоренко Д.Ю.¹, Кравченко В.П.²

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА АКТИВНОГО ВЕСА СТОЛБА ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ПУТЕМ АНАЛИЗА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВБЛИЗИ СТЕНКИ КОЛОШНИКА

В статье приводятся теоретические основы предлагаемого способа. Проведен анализ факторов, определяющих коэффициент активного веса, а также возможность его использования для совершенствования автоматизированной системы управления ходом печи.

Ключевые слова: доменная печь, активный вес, управление.

Федоренко Д.Ю., Кравченко В.П. Спосіб визначення коефіцієнту активної ваги стовпа шихтових матеріалів у доменній печі шляхом аналізу напруженого стану біля стінки колошника. У статті наводяться теоретичні основи запропонованого способу. Проведений аналіз факторів, які визначають коефіцієнт активної ваги, а також можливості його використання для удосконалення автоматизованої системи управління ходом печі.

Ключові слова: доменна піч, активна вага, управління.

D.Y. Fedorenko, V.P. Kravchenko. The method of determination of active weight's coefficient of the column of blast furnace charging materials by the analysis of stress near the top's wall. The article describes the theoretical fundamentals of the method proposed. Analyzed were the factors which determine the coefficient of active weight and the possibility of its application for further perfection of automatic control over the furnace run.

Keywords :blast furnace, active weight's coefficient, control.

Постановка проблемы. Получение максимальной производительности при определенных условиях доменной плавки требует форсирования хода печи до предела, при котором нарушается ровный сход шихты. В этом заключается основная задача управления ходом печи [1].

Анализ последних исследований и публикаций. Наиболее простым из способов управления сходом материалов является стабилизация давления на колошнике. Однако, это приводит значительным колебаниям давления горячего дутья, которое, как известно, влияет на размер фурменных очагов, определяющих ход всего процесса.

Известен способ ведения доменной плавки с автоматическим поддержанием заданного общего перепада давления газа [2], что позволило снизить колебания параметров дутья при стабильной работе печи. Однако, при расстройстве хода плавки или при работе печи на тихом ходу систему управления дутьевым режимом отключают.

Еще одним способом является управление доменной плавкой с непрерывным контролем и поддержанием установленных пределов изменения частных перепадов давления газа [3]. Но этот способ применим только при устойчивой работе печи с хорошим состоянием профиля и с постоянным качеством шихтовых материалов.

Цель статьи – Состоит в формализации критерия схода шихтовых материалов, который бы адекватно характеризовал ход процесса независимо от режима работы.

Изложение основного материала. Принято считать, что сыпучее тело в доменной печи находится под действием трех основных сил: силы тяжести, силы противодействия газового потока, а также суммарной силой трения, обусловленной внутренним трением шихтовых материалов, внешним трением о кладку печи и выталкивающей силой жидких продуктов плавки.

Равнодействующая этих сил определяет вертикальное давление столба материалов и может быть записана следующим образом

¹ аспирант, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуроль

² доцент, канд. техн. наук, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуроль

$$F_{\gamma} - \Delta P S_{\text{эф}} - F_{\Sigma} = Ma, \quad (1)$$

где Ma - вертикальное давление столба шихтовых материалов, Н,

F_{Σ} - суммарная сила трения, Н,

F_{γ} - сила тяжести действующая на сыпучее тело, Н,

ΔP - перепад давления газа на столбе материалов, Па,

$S_{\text{эф}}$ - эффективная площадь сыпучего тела, м²,

Как видно, из всех факторов, характеризующих сход материалов, учитывается лишь газовый поток. Это вызвано тем, что из всех величин, входящих в выражение (1) непосредственному измерению поддается лишь перепад давления по высоте доменной печи, в том или ином виде. Но ΔP лишь косвенно характеризует движение материалов и потому может, более ли менее эффективно, использоваться лишь в установившемся режиме работы печи. Величина ΔP может определяться не только состоянием столба шихтовых материалов, но и давлением горячего дутья, давлением, поддерживаемым на колошнике, текущим уровнем засыпи и пр.

Иногда используют степень уравнивания, или критерий аэродинамической устойчивости, который представляет собой величину, показывающую, какая часть шихты уравнивается восходящим газовым потоком [3]

$$K_{\text{од}} = \frac{\Delta P}{H\gamma}, \quad (2)$$

где H - высота сыпучего тела в доменной печи, м,

γ - насыпная масса материала в печи, кг/м³.

Для определения $K_{\text{од}}$ используется значение насыпной массы, которая различна для агломерата, кокса и не применима к тестообразным формованиям в зоне когезии и жидким продуктам плавки.

Наиболее показательным критерием схода материалов являлся бы безразмерный коэффициент активного веса, который определяется как отношение вертикального давления столба материалов к силе тяжести, действующего на него [1]

$$k_a = \frac{Ma}{F_{\gamma}}. \quad (3)$$

Непосредственное измерение k_a невозможно вследствие крайне высоких температур и агрессивных условий, обусловленных спецификой процесса.

Известен метод косвенного определения коэффициента активного веса, описанный в [4].

Данная методика основана на загрузке материала в печь предварительно взвешенными малыми порциями, измерении силы трения между стальным стержнем и материалом на колошнике и вычислению коэффициента активного веса согласно выражению (1). Очевидно, что этот способ имеет ряд недостатков.

Во-первых, при загрузке материала в печь, происходит сегрегация материала и уложенный слой материала, в котором производится измерение силы трения, не обладает той массой, которую получили при измерении массы материала в подаче.

Во-вторых, при измерении силы трения материала о стальной стержень, в силу того, что в измерении участвует малая порция материала, на показания оказывает значительное влияние количество материала на колошнике, ориентация поверхности относительно стержня и вид этого материала.

В-третьих, состояние малой порции материалов весьма затруднительно экстраполировать на весь материал в печи.

В работе сделана попытка получить метод косвенного определения k_a , лишенный перечисленных недостатков.

Способ основан на анализе напряженного состояния вблизи стенок печи и не требует корректировок схем загрузки материала в печь.

Ниже приведено краткое математическое описание предложенного метода, в котором принимаются некоторые допущения, проверенные на экспериментальных данных и использо-

вани более громоздких математических моделей, применение которых в действующих АСУТП в режиме «on-line» связано с известными сложностями. Внутри объема шихтовых материалов действует симметричный тензор напряжений, который относительно к цилиндрической системе координат в плоском случае может быть записан как

$$\begin{vmatrix} \sigma_z & \tau_{rz} \\ \tau_{rz} & \sigma_r \end{vmatrix}$$

Экспериментально установлено [5], что между компонентами тензора напряжений существует связь вида

$$\sigma_r = \sigma_r(z) \quad \tau_{rz} = \tau_{rz0}^w f_w \frac{r}{R_k} \quad (4)$$

где τ_{rz}, τ_{rz0}^w - касательные напряжения в слое и у стенки колошника, соответственно;

$f_w = tg\Psi$ - коэффициент внутреннего трения материала;

Ψ - угол внутреннего трения материала;

R_k - радиус колошника, м.

Система (2) состоит из двух уравнений и трех неизвестных, что делает ее статически неразрешимой. Для того, чтобы система получилась замкнутой примем гипотезу о принадлежности компонент тензора напряжений (4) конусу Кулона-Мора, который задается зависимостью [6]

$$(\sigma_z - \sigma_r)^2 + 4\tau_{rz}^2 = \sin^2 \Psi (\sigma_z + \sigma_r)^2 \quad (5)$$

Подставляя (4) в (5) получим

$$\sigma_z = \sigma_r \left[(1 + 2f^2) \mp \sqrt{(1 + 2f^2)^2 - 1 - 4f_w^2 \left(\frac{r}{R_k}\right)^2 (1 + f^2)} \right] = \frac{1}{\xi_\sigma} \sigma_r \quad (6)$$

где f - коэффициент трения материала о стены печи;

ξ_σ - коэффициент бокового давления;

R_k - радиус колошника, м.

Рассмотрим теперь более подробно схему сил, действующих на слой материала на колошнике (рис.1).

Выражение (1) можно переписать как

$$F_\gamma - \pi R_k^2 \Delta P - \sigma_{Rk} f_w 2\pi R_k H_{cp} = \int_S \sigma_{z0} dS \quad (7)$$

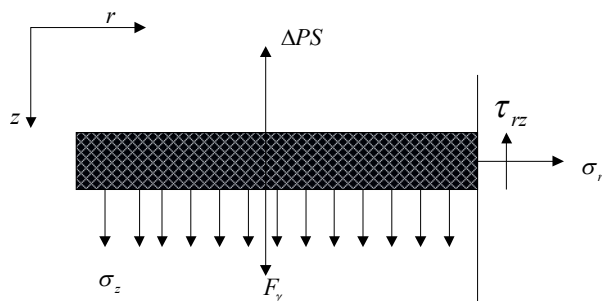


Рис.1 - Схема сил, действующих на элементарный слой материала

Интегрируя (7) по площади колошника с учетом (6), можно получить для коэффициента активного веса

$$k_a = \frac{Ma}{Mg} = \frac{1}{1 + \frac{2f_w H_{cp}}{R_k C_1} + \frac{1}{C} \frac{k_1 \Delta P}{\sigma_{Rk}}} \quad (8)$$

где $C = 0.5(\alpha C_n + (1 - \alpha)C_a)$

Значение $\alpha = 0$ соответствует активному напряженному состоянию у стен колошника, значение $\alpha = 1$ соответствует пассивному напряженному состоянию.

Коэффициенты C_n и C_a вычисляются согласно выражению

$$C_n = \left(1 + 2f^2 \mp \frac{\sqrt{[(1 + 2f^2)^2 - 1]^3} - \sqrt{[(1 + 2f^2)^2 - 1 - 4f_w^2(1 + f^2)]^3}}{6f_w(1 + f^2)} \right) \quad (8)$$

Т.к. в выражение (8), вообще говоря, было бы верным в качестве ΔP подставлять перепад давления газов на слое расположенном на колошнике, то вводится коэффициент адаптации, позволяющий производить расчет по перепаду давления газа по высоте печи.

Из выражения (7) следует, что коэффициент активного веса определяется безразмерным фактором $\frac{\Delta P}{\sigma_{Rk}}$ и коэффициентами внутреннего f_w и внешнего трения f материалов.

Величина k_a , находится в диапазоне

$$\left(0; \left[1 + \frac{2f_w^{\min} H_{cp}}{R_k C_1} \right]^{-1} \right),$$

где f_w^{\min} - минимально возможный угол внутреннего трения материалов в печи.

Существует связь между перепадом давления на столбе материалов и боковым давлением шихты: при росте ΔP шихтовый материал постепенно переходит во взвешенное состояние, что уменьшает боковое давление на стенку колошника σ_{Rk} и коэффициент активного веса начинает асимптотически стремиться к нулю.

В процессе движения происходит деформация и перемещение слоев материалов, что изменяет коэффициент внутреннего трения.

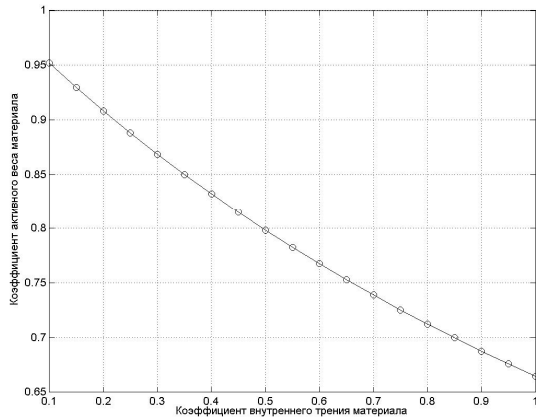


Рис.2 - Зависимость коэффициента активного веса материала от коэффициента внутреннего трения

что составляет 28% от возможного. Такой результат совпадает с общепринятым мнением [7], согласно которому, нарушение схода шихты в доменных печах связывают, в основном, с ухудшением ее газопроницаемости в зоне шлакообразования и в зоне твердых материалов и образованием сводовых структур в процессе движения.

Для измерения силы давления наиболее часто используют тензометрические датчики силы. Эти датчики имеют степень защиты вплоть до IP68, что делает их устойчивыми к запыленности, загазованности и влаге. Однако температурный диапазон, в котором они могут применяться, обычно имеет верхнюю границу не более 80 °С. Хотя колошник и является самой холодной зоной доменной печи, температуры здесь могут превышать 400°С, что вызывает необходимость разработки и использования схемы измерения бокового давления материала, исключающей воздействие температуры на чувствительный элемент.

Для определения наиболее подходящего способа измерения была создана экспериментальная установка, имитирующая взаимодействие восходящего газового потока с массивом сыпучих материалов.

В силу того, что коэффициент активного веса, характеризует сход всего столба шихтовых материалов, было бы рационально не использовать его как единственный критерий для системы управления, а дополнить им уже существующие. Предлагается использование следующих величин для характеристики схода материалов: коэффициент активного веса шихтовых мате-

риализуем, как влияет изменение коэффициента внутреннего трения на коэффициент активного веса. Для этого варьируем f_w от 0,1, соответствующего почти полному разрыхлению материала до 1, максимального сжатия и положим $\Delta P = 0$ в выражении (5).

График $k_a = k_a(f_w)$, приведен на рисунке 2. Из графика видно, что с увеличением f_w коэффициент активного веса монотонно убывает, что объясняется увеличением силы трения препятствующей движению материала.

Уменьшение k_a во всем диапазоне f_w составляет $\Delta k_a = 0,92 - 0,66 = 0,26$,

риалов k_a , верхний ΔP_e и нижний перепады ΔP_n давления по высоте печи. Т.к. значение об-
шего перепада используется для вычисления k_a , то его повторное
использование было бы избыточным.

Следует также учитывать, что любое управляющее воздействие оказывает влияние не
только на процесс схода, но и на тепловое состояние печи, динамику газов и пр. Для этого, в
процессе управления необходимо также располагать некоторыми критериями ограничивающие
степень применения того или иного воздействия. Такой подход позволяет строить верхний уро-
вень АСУТП доменной плавки, основанный на обобщенных безразмерных критериях, но его
рассмотрение выходит за рамки данной статьи.

Выводы

1. Предложена методика определения коэффициента активного веса шихтового материала в доменной печи.
2. За счет наличия информации о коэффициенте активного веса появится возможность оптимального форсирования хода печи при наиболее полном использовании энергии газового потока.
3. Ход печи будет детерминированным в неустановившихся режимах работы – задувка печи, нарушения хода печи, работа печи на малом ходе и пр.

Список использованных источников:

1. Готлиб А.Д. Доменный процесс/А.Д.Готлиб. – М.:Металлургиздат, 1988. – 504 с.
2. Буклан И.З. Работа доменной печи с автоматической стабилизацией дутьевого режима / И.З.Буклан, А.А Бачинин., А.А Третьяк. и др. // М.:Сталь, 1991. – №11.– С.18 – 21
3. Клемперт В.М., Френкель М.М. Контроль и управление газораспределением доменной печи./ В. М. Клемперт, М. М. Френкель, А. А. Гришкова// – М.: Металлургия, 1993. – 144 с.
4. Патент № 2147037 РФ, Способ ведения доменной плавки. / Б.А. Марсуверский, А.Ф. Авцинов, М.Ф. Марьясов и др.// опубл. 27.03.2000. – 8 с.
5. Каталымов А.В. Дозирование сыпучих и вязких материалов. / А.В.Каталымов, В.А. Любартович. – Ленинград.:Химия, 1990. – 230 с.
6. Садовская О.В. Математическое моделирование в задачах сыпучих механики сред / О.В. Садовская., В.М.Садовский. – М.:Физматлит, 2008. – 365 с.
7. Тарасов В.П. Газодинамика доменного процесса /В.П. Тарасов. – М.:Металлургия, 1990. – 210 с.

Рецензент: В.А.Маслов,
д.т.н, проф, ПГТУ

Статья поступила 20.04.2010