

УДК 681.5

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ СВИНЦОВОГО АГЛОМЕРАТА В ШАХТНЫХ ПЕЧАХ

Г.К. Шадрин, А.Ж. Аяганова

Восточно-Казахстанский государственный технический университет, г. Усть-Каменогорск

E-mail: AyazhanAyaganova@mail.ru

*Рассмотрен процесс переработки свинцового агломерата в шахтных печах. Предложен метод разбиения рабочего пространства шахтной печи на зоны. Показан подход к применению ячеечных моделей построения процессов шахтной плавки. Разработана математическая модель материальных потоков восстановительной зоны шахтной печи.*

### Ключевые слова:

*Шахтная печь, свинец, математическая модель, ячейка идеального смешения, материальный баланс.*

В связи со стремительным прогрессом вычислительной техники, а так же с широким распространением цифровых ЭВМ появилась возможность реализации математических моделей сложных процессов, отражающих основные закономерности их протекания.

Работа шахтных печей представлена рядом сложных химических и физических процессов, протекающих в шихте, пронизываемой встречным потоком газов. Важными контролируемыми параметрами являются выход свинца и потеря свинца с отвальным шлаком. Динамические свойства термохимического процесса, протекающего в шахтной печи, являются выражением взаимосвязи большого числа величин различной физической природы. Это взаимосвязь определяется в основном химическими, физико-химическими и гидродинамическими закономерностями, а также требованиями материального и теплового баланса [1–3].

Особенность динамических связей состоит в весьма большом транспортном запаздывании при воздействии на вход системы со стороны изменения состава и расхода шихты и существенном сокращении запаздывания при изменениях расхода подаваемого дутья [4].

Сложность тепло- и массообменных процессов, протекающих в шахтных печах, отсутствие надежных данных о теплофизических характеристиках перерабатываемых в них материалов в значительной степени ограничивает возможность применения расчетных методов при оценке тепловой работы шахтных печей. В настоящее время эффективность работы шахтных печей оценивается в основном на базе статической обработки производственных данных [5].

Основные показатели шахтной свинцовой плавки зависят от целого комплекса входных параметров, и поэтому оптимальное управление процессом плавки нельзя решать только на уровне систем автоматической стабилизации отдельных входных и выходных параметров, необходимо построение математических моделей и алгоритмов управления [4].

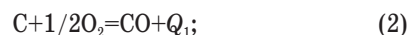
Шахтная печь представляет собой агрегат с вертикальным рабочим пространством, в которое сверху загружают специально подготовленную шихту и кокс, а снизу через фурмы вдувают воз-

дух. В шахте происходит нагрев и расплавление шихты, сопровождаемое химическими реакциями, в результате чего получают черновой металл, шлак, штейн и шпейзу [6].

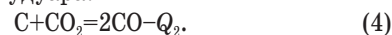
Исходными материалами для плавки являются свинцовый агломерат, кокс и воздух. Агломерат содержит свинец, сопутствующие металлы и все необходимые компоненты для образования шлака. Загрузка агломерата и кокса в печь осуществляется послойно (рис. 1). В нижней части печи (горне) скапливаются жидкие продукты плавки: черновой свинец, штейн, шлак. Выше слоя шлака расположен столб шихты, нижняя часть (0,5...1,0 м) которого состоит из раскаленного кокса (фокус печи). Для горения кокса через фурмы в печь подают сжатый воздух. В результате интенсивного горения кокса температура в фокусе печи достигает 1500 °С. Раскаленные печные газы, проходя через столб шихты, нагревают ее и участвуют в реакциях восстановления окисленных соединений свинца и других металлов. На выходе из печи (в колошнике) газы имеют температуру 200...400 °С.

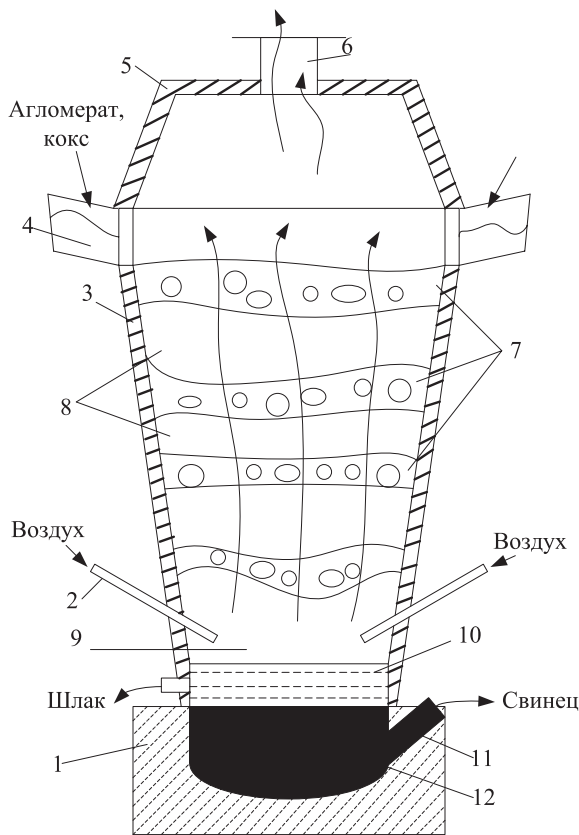
Столб шихты (4...6 м) по мере выгорания кокса и выплавления продуктов плавки медленно опускается вниз (около 1 м/ч), и его пополняют очередными загрузками агломерата и кокса. Жидкие продукты плавки стекают вниз и собираются во внутреннем горне, где вследствие разности плотностей расслаиваются и выпускаются из печи по мере накопления.

Кокс, загружаемый в печь, играет роль топлива и роль восстановителя. Сжигание кокса является основным процессом в шахтной плавке, влияющим на состав газовой фазы и удельную производительность печи [7]. В области фурм кокс сгорает по реакциям:



Горячие газы, поднимаясь вверх, нагревают шихту,  $CO_2$  взаимодействуют с раскаленным коксом по реакции Будуара:





**Рис. 1.** Схема шахтной печи свинцовой плавки: 1 – горн; 2 – фурмы; 3 – шахта печи; 4 – загрузочные люки; 5 – колошник; 6 – газоход; 7 – агломерат; 8 – кокс; 9 – фокус печи; 10 – шлак; 11 – сифон для выпуска свинца; 12 – свинец

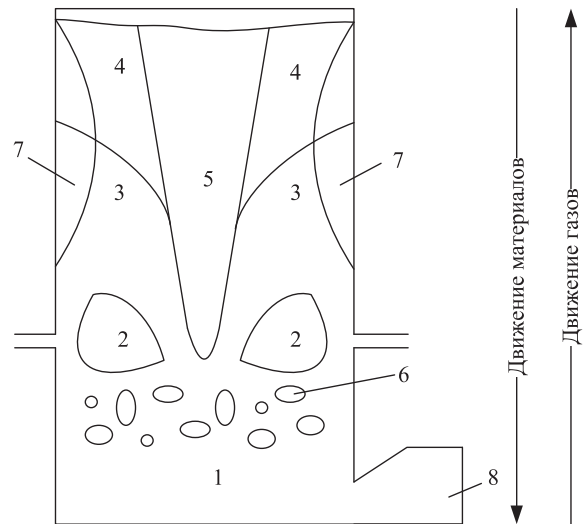
Образующийся по реакции (1) оксид углерода является основным восстановителем в шахтной печи. Восстановление оксидов металлов оксидом углерода происходит в результате протекания реакции:



Основными химическими процессами являются: горение кокса и восстановление оксидных соединений шихты. Условно, исходя из поведения шихты и распределения температур, рабочее пространство шахтной печи по вертикальному сечению разделим на зоны (рис. 2). Внутренний горн (зона 1) заполнен жидкими продуктами плавки, коксом и тугоплавкими компонентами агломерата, не успевшими прореагировать в шахте печи. Температура в ней 700...1000 °С. На фурмах всегда присутствует большой или меньший по высоте слой, состоящий преимущественно из кокса (зона 6) при  $t \approx 1250$  °С.

Немного выше фурм располагается окислительная зона (зона 2). Это зона самых высоких температур (1300...1500 °С). Она заглублена к центру печи на 300...400 мм и имеет примерно такую же протяженность по высоте. В центре печи располагается непроплавляемый слой шихты при  $t \approx 200$ ...700 °С (зона 5). По-видимому, толщина это-

го слоя изменяется в зависимости от условий процесса. Зона 7 является зоной настывлей ( $t \approx 150$ ...300 °С). Выше окислительной зоны располагается восстановительная зона 3,  $t$  до 900 °С, где происходит процесс газификации углерода и восстановление оксидов металлов. Высота этой зоны от уровня фурм 3...3,5 м.

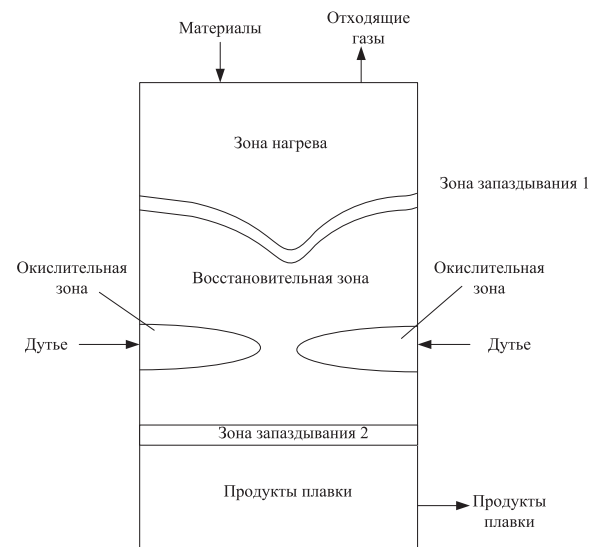


**Рис. 2.** Схема расположения реакционных зон

И, наконец, верхние горизонты печи занимает подготовительная зона 4, где шихта нагревается до 400...450 °С. Зона 8 – сифон.

На основе изученной литературы [1–7] рабочее пространство шахтной печи условно разделили на зоны: нагрева; зону запаздывания 1; восстановительную; окислительную; зону запаздывания 2; зона продуктов плавки (рис. 3).

Было принято допущение, что зона нагрева, восстановительная и окислительная зоны – ячейки идеального смешения. Зона запаздывания 1, зона запаздывания 2 – ячейки идеального вытеснения [8, 9].



**Рис. 3.** Шахтная печь с разбиением на зоны

В восстановительной зоне реакции (2)–(5) являются основными. В окислительной зоне реакции (1), (4) являются основными.

Было принято, что в восстановительной зоне протекает эквивалентная реакция (6):



Условно принято, что объемы ячеек не изменяются, не зависят от режима печи. Входной поток материалов постоянен. Концентрация содержания свинца и кокса изменяется. В окислительной зоне не происходит восстановительных реакций.

Загрузка материалов равномерна по всей поверхности печи. Горение кислорода равномерно по всему объему окислительной зоны. Восстановительные реакции происходят однородно по всему объему восстановительной зоны. В зонах запаздывания не происходит физико-химических процессов.

Кроме того, принято следующее допущение: образование шлака происходит на входе в зону запаздывания 2. Поток шлака линейно зависит от температуры в восстановительной зоне.

Для нахождения зависимости содержания свинца в отвальном шлаке, в зависимости от влияющих факторов, было составлено уравнение материального баланса по окиси свинца в восстановительной зоне.

Поскольку в зоне нагрева химических превращений не происходит, материальный баланс в восстановительной зоне находится из соотношения (7):

$$q_{\text{вх}} - q_{\text{вых}} - q_{\text{х.р.}} = q_{\text{нак}}, \quad (7)$$

где  $q_{\text{вх}}$  – входной поток PbO, м<sup>3</sup>/ч;  $q_{\text{вых}}$  – выходной поток PbO, м<sup>3</sup>/ч;  $q_{\text{х.р.}}$  – скорость химической реакции, м<sup>3</sup>/ч;  $q_{\text{нак}}$  – поток на накопление, м<sup>3</sup>/ч.

Входной поток найден по формуле (8):

$$q_{\text{вх}} = v^{\text{вх}} \cdot C_{\text{PbO}}^{\text{вх}}, \quad (8)$$

где  $v^{\text{вх}}$  – входной поток шихты, м<sup>3</sup>/ч,  $C_{\text{PbO}}^{\text{вх}}$  – начальное содержание PbO в шихте, %.

Выходной поток найден по формуле (9):

$$q_{\text{вых}} = F_{\text{ш}} C_{\text{PbO}}, \quad (9)$$

где  $F_{\text{ш}}$  – поток шлака, м<sup>3</sup>/ч;  $C_{\text{PbO}}$  – содержание PbO, %.

Поток шлака найдем из соотношения (10):

$$F_{\text{ш}} = \kappa_{\text{ш}} (T_{\text{в.з.}} - T_{\text{ном.в.з.}}), \quad (10)$$

где  $\kappa_{\text{ш}}$  – коэффициент шлакообразования, зависит от температуры печи и производительности печи;  $T_{\text{в.з.}}$  – температура в восстановительной зоне, °С;  $T_{\text{ном.в.з.}}$  – номинальная температура в восстановительной зоне, °С.

Учитывая формулу (10), выражение выходного потока примет вид (11):

$$q_{\text{вых}} = \kappa_{\text{ш}} (T_{\text{в.з.}} - T_{\text{ном.в.з.}}) C_{\text{PbO}}, \quad (11)$$

где  $\kappa_{\text{ш}}$  – коэффициент шлакообразования, зависит от температуры печи и производительности печи;  $T_{\text{в.з.}}$  – температура в восстановительной зоне, °С;  $T_{\text{ном.в.з.}}$  – номинальная температура в восстановительной зоне, °С;  $C_{\text{PbO}}$  – содержание PbO, %.

Так как химическая реакция (5) является гетерогенной, то выражение скорости химической реакции примет следующий вид, формула (12):

$$q_{\text{х.р.}} = \kappa C_c S_{\text{PbO}}, \quad (12)$$

где  $\kappa$  – константа скорости реакции;  $C_c$  – содержание углерода в коксе, %;  $S_{\text{PbO}}$  – площадь поверхности реакции, м<sup>2</sup>.

Константа скорости реакции может быть рассчитана из выражения (13):

$$k = A e^{\frac{-E_a}{RT}}, \quad (13)$$

где  $E_a$  – энергия активации, Дж/моль;  $R$  – газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T$  – абсолютная температура, К;  $A$  – число столкновений.

Было принято, что площадь поверхности реакции  $S_{\text{PbO}}$  зависит от содержания окиси свинца  $C_{\text{PbO}}$  в шихте линейно, формула (14):

$$S_{\text{PbO}} = \kappa_2 C_{\text{PbO}}, \quad (14)$$

где  $\kappa_2$  – коэффициент пропорциональности;  $C_c$  – содержание углерода в коксе, %;  $C_{\text{PbO}}$  – содержание PbO в шихте, %.

С учетом формул (13), (14) выражение для расчета скорости химической реакции примет вид (15):

$$q_{\text{х.р.}} = A e^{\frac{-E_a}{RT}} C_c \kappa_2 C_{\text{PbO}}, \quad (15)$$

где  $E_a$  – энергия активации, Дж/моль;  $R$  – газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T$  – абсолютная температура, К;  $A$  – число столкновений;  $\kappa_2$  – коэффициент пропорциональности;  $C_c$  – содержание углерода в коксе, %;  $C_{\text{PbO}}$  – содержание PbO в шихте, %.

Поток на накопление в ячейке идеального смешения имеет вид (16):

$$q_{\text{нак}} = V \frac{dC_{\text{PbO}}}{dt}, \quad (16)$$

где  $V$  – объем ячейки (восстановительной зоны), м<sup>3</sup>;  $C_{\text{PbO}}$  – содержание PbO в шихте, %.

С учетом формул (8), (11), (15), (16) выражение материального баланса примет вид (17):

$$v^{\text{вх}} C_{\text{PbO}}^{\text{вх}} - \kappa_{\text{ш}} (T_{\text{в.з.}} - T_{\text{ном.в.з.}}) C_{\text{PbO}} - A e^{\frac{-E_a}{RT}} C_c \kappa_2 C_{\text{PbO}} = V \frac{dC_{\text{PbO}}}{dt}, \quad (17)$$

где  $v^{\text{вх}}$  – входной поток шихты, м<sup>3</sup>/ч;  $C_{\text{PbO}}^{\text{вх}}$  – начальное содержание PbO в шихте, %;  $\kappa_{\text{ш}}$  – коэффициент шлакообразования;  $T_{\text{в.з.}}$  – температура в восстановительной зоне, °С;  $T_{\text{ном.в.з.}}$  – номинальная температура в восстановительной зоне, °С;  $C_{\text{PbO}}$  – содержание PbO, %;  $E_a$  – энергия активации, Дж/моль;  $R$  – газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T$  – абсолютная температура, К;  $A$  – число столкновений;  $C_c$  – содержание углерода в коксе, %;  $\kappa_2$  – коэффициент пропорциональности;  $V$  – объем ячейки (восстановительной зоны), м<sup>3</sup>.

## Выводы

Рассмотрена шахтная печь как объект моделирования. Составлена схема эквивалентных хими-

ческих реакций процесса. Выполнено условное разбиение рабочего пространства на идеализированные зоны: окисления, восстановления, нагрева и запаздывания, позволяющие упростить математическое описание. Разработана математическая модель зоны восстановления, отражающая потоки свинца в продукты плавки.

тическое описание. Разработана математическая модель зоны восстановления, отражающая потоки свинца в продукты плавки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шадрин Г.К., Аяганова А.Ж. Особенности математического моделирования и автоматизация шахтных печей для выплавки свинца // Вестник Семипалатинского государственного университета им. Шакарима. – 2011. – № 3. – С. 27–30.
2. Ашимов А., Лисовский Д.И. О построении математической модели шахтной печи для целей автоматизации плавки окисленных никелевых руд // Изв. Вузов. Сер. «Цветная металлургия». – 1963. – № 1. – С. 144–152.
3. Ашимов А., Лисовский Д.И. К вопросу о математической модели зоны активного теплообмена шахтной печи для плавки окисленных никелевых руд // Изв. Вузов. Сер. «Цветная металлургия». – 1963. – № 3. – С. 151–156.
4. Основы металлургии. Т. 6. Средства и системы автоматического контроля и управления в цветной металлургии / под ред. И.А. Стригина, А.В. Троицкого. – М.: Металлургия, 1973. – 679 с.
5. Металлургическая теплотехника. Т. 2. Конструкция и работа печей / под ред. В.А. Кривандин, И.Н. Неvedомская, В.В. Кобахидзе и др. – М.: Металлургия, 1986. – 592 с.
6. Металлургия тяжелых цветных металлов / под ред. Н.В. Марченко, Е.П. Вершинина, Э.М. Гильдебрандт. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – 394 с.
7. Зайцев В.Я., Маргулис Е.В. Металлургия свинца и цинка. – М.: Металлургия, 1985. – 263 с.
8. Кафаров В.В., Глебов М.Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств. – М.: Высшая школа, 1991. – 400 с.
9. Бояринов А.И., Кафаров В.В. Методы оптимизации в химии и химической технологии. – М.: Химия, 1969. – 565 с.

Поступила 15.02.2013 г.

UDC 681.5

## MATHEMATICAL MODEL OF LEAD CONCENTRATE PROCESSING IN SHAFT FURNACES

G.K. Shadrin, A.Zh. Ayaganova

East Kazakhstan State Technical University, Ust-Kamenogorsk

*The paper considers lead concentrate processing in blast furnaces. The authors have proposed a method of a shaft furnace workspace area partitioning. The approach to application of cell models for building blast smelting processes was shown. The mathematical model of material flows of shaft furnace reduction zone was developed.*

#### Key words:

*Shaft furnace, lead, mathematical model, ideal mixing cell, mass balance.*

#### REFERENCES

1. Shadrin G.K., Ayaganova A.Zh. *Vestnik Semipalatinskogo Gosudarstvennogo Universiteta imeni Shakarima*, 2011. 3, pp. 27–30.
2. Ashimov A., Lisovskiy D.I. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*, 1963. 1, pp. 144–152.
3. Ashimov A., Lisovskiy D.I. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*, 1963. 3, pp. 151–156.
4. Strigin I.A., Troitskiy A.V. *Osnovy metallurgii. Sredstva i sistemy avtomaticheskogo kontrolya i upravleniya v tsvetnoy metallurgii* (Basic metallurgy. Means and systems of automatic control in non-ferrous industry). Moscow, Metallurgiya, 1973. 6, 679 p.
5. Krivandin V.A., Nevedomskaya I.N., Kobakhidze V.V. *Metallurgicheskaya teplotekhnika. Konstruktsiya i rabota pechey* (Metallurgic thermal engineering. Furnace structure and operation). Moscow: Metallurgiya, 1986. 2, 592 p.
6. Marchenko N.V., Vershinin E.P., Gil'debrandt E.M. *Metallurgiya tyazhelykh tsvetnykh metallov* (Metallurgy of heavy non-ferrous metals). Krasnoyarsk: IPK SFU, 2009. 394 p.
7. Zaytsev V.Ya., Margulis E.V. *Metallurgiya svintsa i tsinka* (Lead and zinc metallurgy). Moscow: Metallurgiya, 1985. 263 p.
8. Kafarov V.V., Glebov M.B. *Matematicheskoe modelirovanie osnovnykh protsessov khimicheskikh proizvodstv* (Mathematical modeling of basic processes in chemical industry). Moscow: Vysshaya shkola, 1991. 400 p.
9. Boyarinov A.I., Kafarov V.V. *Metody optimizatsii v khimii i khimicheskoy tekhnologii* (Optimization methods in chemistry and chemical technology). Moscow: Khimiya, 1969. 565 p.