

ОБОБЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УТИЛИЗАЦИИ ЦИНКСОДЕРЖАЩИХ ПЫЛЕЙ В ВЕЛЬЦ-ПЕЧИ

Проведены работы по изучению влияния предприятий черной металлургии на окружающую среду и созданию технологии утилизации бедных цинксодержащих пылей. Произведен выбор вельц-процесса в качестве технологии утилизации бедных цинксодержащих пылей доменного, конвертерного и мартеновского производств применительно к условиям АО «Северсталь» (г.Череповец). Основной целью работы является создание математической модели процесса с последующей оценкой ее адекватности с помощью экспериментальных установок. Модель планируется использовать для выбора обоснования оптимальных технологических параметров процесса при утилизации данного вида материала.

Разработана обобщенная математическая модель тепломассообмена в вельц-печи. Экспериментальная оценка адекватности данной математической модели проведена на лабораторных печах для сушки гранул в неподвижном и вращающихся слоях.

Определены основные направления дальнейших исследований.

The activities of study of influence of the enterprises of the black metallurgy on the environment and creation of the technology of salvaging poor zinc-included dusts are made. The selection of rotary-process is made, as the technology of the salvaging of the poor zinc-included dusts blast of productions in furnace, converter and open-hearth furnace with reference to conditions of JSD "Severstal" (Cherepovets). The main purpose of the activity is the creation of the mathematical model of the process, with the consequent evaluation of its adequacy with the help of experimental installations. The model is planned to use for the recommendation of optimum technological parameters at salvaging of the given kind of a material.

The generalized mathematical model termomassexchange in the rotary-kiln is developed. For an experimental evaluation of adequacy of the given mathematical model is present laboratory furnaces for the drying particle in fixed and rotated layers.

The main directions of further researches are define.

Актуальность проблемы минимизации техногенного воздействия крупных промышленных предприятий черной металлургии, являющихся источниками образования ряда твердых токсичных отходов, на окружающую среду неоспорима. Из-за несовершенства современных технологий значительная часть отходов отправляется в хранилища. Содержащиеся в них вещества: соединения свинца, цинка, железа, серы и мышьяка – мигрируют на большие расстояния и загрязняют почвы, атмосферу, по-

верхностные и подземные воды на значительных территориях. К таким отходам относится и пыль мартеновского и конвертерного производств, а также некоторых доменных печей, содержащая в небольших количествах (от 1,0-1,5 до 3,5-4,0 %) соединения цинка*.

* Проблемы утилизации техногенных твердых отходов предприятий черной металлургии / М.Ш.Баркан, Ю.В.Шувалов, М.А.Пашкевич, С.Г.Гендлер М.А.Смолин // Материалы II Междунар. конгресса по управлению отходами. Вэйст Тэк-2001 (издана на компакт-диске). 2001.

Авторы являются участниками работ по изучению влияния предприятий черной металлургии на окружающую среду и созданию технологии утилизации данного вида пыли применительно к условиям АО «Северсталь» (г.Череповец). Технология будет включать операции производства окатышей из пыли и удаления из них соединений цинка. Окатыши могут затем использоваться в качестве сырья для доменного производства.

С учетом анализа технической базы Череповецкого металлургического комбината наиболее целесообразной признана реализация процесса переработки бедных цинксо-держащих пылей в трубчатых вращающихся (барабанных) печах, применяемых в АО «Северсталь» на известково-доломитовом производстве.

Процесс вельцевания цинксодержащих материалов проводят следующим образом. Материал увлажняется, гранулируется и отправляется в трубчатую вращающуюся печь, представляющую собой расположенный под углом $1-2^\circ$ к горизонту вращающийся барабан. В печном пространстве материал проходит ряд зон, характеризующихся различными физико-химическими параметрами. В зоне сушки материал нагревается до температуры $250-300^\circ\text{C}$ для удаления физической и кристаллогидратной влаги из гидроксидов железа, гидроцинкатов и др. Далее материал попадает в зону разложения сульфатов и карбонатов, где нагревается до $700-900^\circ\text{C}$. Здесь сульфаты цинка и железа, карбонаты кальция и магния разлагаются и начинается возгонка сульфидов и оксидов свинца и кадмия. В реакционной зоне (зоне восстановления материала) при температуре выше 1200°C развиваются процессы горения и газификации углерода. Полностью отгоняются кадмий, почти полностью индий и таллий, а также 70-80 % цинка и свинца. Нелетучие металлы восстанавливаются до металлического состояния. Легкоплавкие металлы в этой зоне могут оплавляться, что приводит в некоторых случаях к настylieобразованию. В зоне образования клинкера протекают реакции дальнейшего восстановления металлов и реакции обмена штейновых и шлаковых фаз. SiO_2 и Al_2O_3 образует

с оксидами соответственно силикатные и алюминатные формы.

Для реализации такой технологии на практике важно создать адекватную математическую модель процесса, которую можно будет использовать для обоснования оптимальных технологических параметров утилизации данного вида материала.

На первом этапе работ создана обобщенная математическая модель вельц-процесса, описывающая изменение интенсивности тепломассообмена по длине печи. Функции интенсивности тепломассообмена от различных параметров процесса будут рассмотрены при дальнейших исследованиях для каждой зоны печи. Модель представляет собой систему дифференциальных уравнений, описывающих следующие основные тепло- и массообменные процессы, протекающие между твердой и газообразной фазами:

- теплогенерационный процесс выгорания жидкого или газообразного топлива;
- восстановление металлов из окисленных форм в присутствии твердого углеродистого восстановителя в слое материала;
- возгонку летучих соединений и металлов в газовую фазу;
- окисление металлов в кислородно-воздушной среде и переход их из газовой фазы в твердые пылевидные оксидные соединения, легко увлекаемые газовым потоком и улавливаемые в системе газоочистки.

В модели приняты следующие обозначения: G_m , G_t , G_{Π} и G_r – массовый расход материала, топлива, пыли и газа соответственно, кг/с; v_m – скорость продвижения материала вдоль печи, м/с; B , M , T и Π – соответственно интенсивность переноса вещества из материала в газ, интенсивность образования продуктов реакций, протекающих в материале, интенсивность сгорания топлива и интенсивность образования пыли, кг/(м·с); K_{mi} , K_{vi} , K'_{mi} , K_{ri} , K_{ti} и $K_{\Pi i}$ – относительные массовые концентрации i -го компонента соответственно в материале, в потоке выделяющихся веществ, в общей массе нелетучих продуктов реакций, в газовой смеси, в общей массе продуктов горения топлива и в пыли; $Q_{г.м}$ – тепловой поток от материала к

газу (данная переменная в модели является мерой интенсивности теплообмена между газом и материалом), Дж/(м·с); Q_T и Q_P – тепло сгорания топлива и металлических возгонов, Дж/(м·с); $Q_{\text{пот}}$ – удельный тепловой поток через футеровку печи в окружающее пространство, Дж/(м·с); c_M – средняя удельная теплоемкость продуктов реакций в шихте без образования летучих веществ, Дж/(кг·К); c_B – средняя удельная теплоемкость выделяемых из материала газообразных компонентов, Дж/(кг·К); c_G – средняя удельная теплоемкость газа, Дж/(кг·К); q_M – теплопотребление материала, Дж/кг; q_T – теплотворная способность топлива с учетом внесенного топливом тепла, Дж/кг; q_B – тепловой эффект от горения компонентов материала, перешедших в газовую фазу, Дж/кг; q_P – тепловой эффект от окисления металлических возгонов с учетом фазовых превращений, Дж/кг; t_M , t_G и t_c – температура материала, газа и окружающей среды, °С; l – текущая координата по длине печи, м.

Система балансовых уравнений имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{G_M}{v_M} \right) + \frac{\partial G_M}{\partial l} = -B; \quad (1)$$

$$\frac{1}{v_M} \frac{\partial K_{Mi}}{\partial \tau} + \frac{\partial K_{Mi}}{\partial l} = \frac{K_{Mi} - K_{Bi}}{G_M} B; \quad (2)$$

$$\frac{1}{v_M} \frac{\partial K_{Mi}}{\partial \tau} + \frac{\partial (K_{Mi})}{\partial l} = -\frac{K'_{Mi}}{G_M} M; \quad (3)$$

$$\frac{1}{v_M} \frac{\partial t_M}{\partial \tau} + \frac{\partial t_M}{\partial l} = \frac{Q_{G.M} - q'_B B - q_M M}{q_M c_M}, \quad (4)$$

где $q'_B = q_B + t_M(c_B - c_M + A)$; $A = \sum_{i=1}^m \frac{\partial c_M}{\partial K_{Mi}} \times (K_{Mi} - K_{Bi})$; m – число компонентов материала;

$$\frac{\partial G_T}{\partial l} = T; \quad (5)$$

$$\frac{\partial G_P}{\partial l} = -P; \quad (6)$$

$$\frac{\partial G_G}{\partial l} = -(B + T - P); \quad (7)$$

$$\frac{\partial K_{Gi}}{\partial l} = \frac{K_{Gi} - K_{Bi}}{G_G} M + \frac{K_{Gi} - K_{Ti}}{G_G} T + \frac{K_{Pi} - K_{Gi}}{G_G} P; \quad (8)$$

$$\frac{\partial t_G}{\partial l} = \frac{Q_{G.M} + Q_{\text{пот}} + q'_B B - q'_T T + q'_P P}{G_G \left(c_G + t_G \frac{\partial c_G}{\partial t_G} \right)}, \quad (9)$$

где

$$q'_B = \left\{ c_{Gn} + \sum_{i=1}^{n-1} [(c_{Gi} - c_{Gn}) K_{Bi}] \right\} t_G - c_B t_M;$$

$$q'_T = q_T - \left\{ c_{Gn} + \sum_{i=1}^{n-1} [(c_{Gi} - c_{Gn}) K_{Ti}] \right\} t_G;$$

$$q'_P = q_P + \left\{ c_{Gn} + \sum_{i=1}^{n-1} [(c_{Gi} - c_{Gn}) K_{Pi}] \right\} t_G;$$

c_{Gi} – средние удельные теплоемкости чистых компонентов газа, Дж/(кг·К); n – число компонентов газа.

Средние удельные теплоемкости газов и их производные в зависимости от температуры газа определяются по справочной литературе. Производная средней удельной теплоемкости газовой смеси по температуре

$$\frac{\partial c_G}{\partial t_G} = \frac{\partial c_{Gn}}{\partial t_G} + \sum_{i=1}^{n-1} \left[\left(\frac{\partial c_{Gi}}{\partial t_G} - \frac{\partial c_{Gn}}{\partial t_G} \right) K_{Gi} \right].$$

В рассматриваемой модели уравнение (1) представляет собой уравнение материального баланса для материала при обмене массой с газовой фазой при нестационарном режиме. Уравнение материального баланса (2) для отдельных компонентов материала введено для учета изменения состава шихты из-за происходящих в ней физико-химических процессов. Баланс процессов разложения и образования веществ, а также обменных реакций в материале без образования летучих веществ отражает уравнение (3). Уравнение теплового баланса (4) выведено из предположения, что тепло, получаемое от газа материалом, частично уносится в виде физического и химического тепла с образующейся газовой фазой, а ос-

тальная его часть расходуется на нагрев материала и завершение физико-химических превращений в нем.

Уравнения материального баланса (5)-(8) составлены для топлива, пыли, общей газовой фазы и ее компонентов в соответствии со следующими допущениями:

- так как перепад давления по длине печи незначителен, можно считать процессы в газовом тракте изобарическими, вследствие чего уравнения для давления газа не рассматриваются;

- скорость движения газового потока в сотни раз превышает скорость движения материалов, поэтому условия считаются стационарными.

Уравнение теплового баланса для газа (9) выведено на основании следующих соображений: тепло сгорания топлива и окисления металлических возгонов, а также физическое тепло компонентов материала, перешедших в газовую фазу, расходуется на нагрев металла и частично теряется через футеровку печи в окружающее пространство.

Начальные условия для системы уравнений (1)-(9) следующие: при $\tau = 0$ $G_m(l, \tau) = G_m^{\text{нач}}(l)$; $K_m(l, \tau) = K_m^{\text{нач}}(l)$; $t_m(l, \tau) = t_m^{\text{нач}}(l)$. Граничные условия: при $l = 0$ $G_m(l, \tau) = G_{m1}(\tau)$; $K_m(l, \tau) = K_{m1}(\tau)$; $t_m(l, \tau) = t_{m1}(\tau)$;

при $l = L$ (здесь L — длина печи, м) $G_m(l, \tau) = G_{m2}(\tau)$; $K_m(l, \tau) = K_{m2}(\tau)$; $t_m(l, \tau) = t_{m2}(\tau)$; $K_{gi}(l, \tau) = K_{gi}^i(\tau)$.

Для решения системы уравнений (1)-(9) необходимо определить вид функций интенсивности тепломассообмена в пространстве вельц-печи В, М, Т, П и $Q_{г.м}$ для каждой описанной выше зоны. С данной целью будут проведены дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования.

Для экспериментальной оценки адекватности данной математической модели можно использовать лабораторные печи для сушки гранул в неподвижном и вращающихся слоях. Предполагается провести следующий цикл экспериментальных и теоретических исследований:

- разработка математических моделей процессов сушки и обжига, в том числе отгонки и дистилляции материалов и оценка их адекватности;

- оптимизация параметров процесса утилизации с помощью созданных математических моделей;

- экспериментальное уточнение физико-химических и кинетических закономерностей, характеризующих влияние исходных параметров на качество получаемой продукции.