

УДК 669.1:622

*д.т.н. Петрушов С.Н.,*

*к.т.н. Русанов И.Ф.,*

*Дорогой Е.В.*

*(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина, evgeniy.dorogoy@gmail.com)*

## **АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДА ВОЗВРАТА И ТВЕРДОГО ОСТАТКА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ АГЛОМЕРАТА**

*Аналітично розраховані коефіцієнти виходу твердого залишку і кількості повернення. Отримані залежності, що дозволяють зробити кількісну оцінку впливу хімічного складу шихти на параметри агломерації.*

**Ключові слова:** *агломераційна шихта, повернення, продуктивність, спік, твердий залишок.*

*Аналитически рассчитаны коэффициенты выхода твердого остатка и количества возврата. Получены зависимости, позволяющие производить количественную оценку влияния химического состава шихты на параметры агломерации.*

**Ключевые слова:** *агломерационная шихта, возврат, производительность, спек, твердый остаток.*

При производстве агломерата по современной технологии неизбежно наличие мелочи в получаемом спеке. Эта мелочь непригодна для использования в доменном процессе и отсеивается на участке выдачи агломерата в аглоцехе. К тому же, в процессе транспортировки агломерата и при его перегрузках, образуется дополнительное количество мелочи, которая отсеивается перед загрузкой шихтовых материалов в доменные печи. Количество этой мелочи может быть различным, в зависимости от состава спекаемых шихт, условий спекания на аглоустановках, минимального размера зерна, по которому происходит разделение на годный и возврат, и др.

Выделенная из агломерата мелочь, имеющая в среднем крупность 4,5-5,0 мм [1] повторно вводится в шихту в виде возврата. Ввод в шихту возврата положительно влияет на процесс спекания агломерата и технико-экономические показатели процесса [2].

Количество возврата в шихте должно быть оптимальным. При недостаточном его количестве в шихте режим спекания агломерата будет отличаться от нормального, что скажется на производительности агло-

установки и качестве агломерата. В случае, когда количество получаемого возврата превосходит потребное его количество, уменьшается выход годного агломерата.

Таким образом, выход годного и количество возврата, выделяемого из спека и поступающего в шихту, являются наиболее важными конечными характеристиками аглопроцесса.

Количество возврата, которое участвует в агломерационном процессе, в практике агломерационного производства выражается в долях или в процентах по отношению к шихте или к полученному аглоспеку. Поэтому одно и то же участие возврата в процессе спекания характеризуется величинами, имеющими разное численное значение, в зависимости от того, по отношению к чему (шихте или спеку) относят возврат. Для нахождения зависимости между этими величинами обозначим количество возврата в этих двух случаях через  $x$  (доля возврата в сухой шихте) и  $b$  (выход возврата от спека в долях).

Масса спека  $G$ , получаемого в агломерационной установке, определяется как сумма израсходованного на спекание возврата  $B$ , постели  $\Pi$  и твердого остатка сухих материалов  $\text{III} \cdot k$ :

$$G = \Pi + B + \text{III} \cdot k, \quad (1)$$

где  $\text{III}$  – количество сухих, без возврата, материалов, загружаемых в аглоустановку, кг;

$k$  – коэффициент выхода твердого остатка из сухих (без возврата) материалов, подвергнутых агломерации.

Примем, что масса возврата в процессе агломерации не изменяется. Согласно принятым обозначениям содержание возврата в сухой шихте и его выход из спека соответственно будут равны

$$x = \frac{B}{\text{III} + B} \quad \text{и} \quad b = \frac{B}{G}. \quad (2)$$

Отнесенное к массе сухой шихты количество постели, в долях  $\psi$  определяется соотношением

$$\psi = \frac{\Pi}{G}. \quad (3)$$

Из приведенных соотношений (2) и (3) следует

$$B = b \cdot G, \quad \Pi = \psi \cdot G \quad \text{и} \quad \text{III} = \frac{b \cdot G - b \cdot x}{x}. \quad (4)$$

После подстановки в уравнение (1) соответствующих величин, определенных по формулам (4), после преобразования и упрощения получим уравнение (5), связывающее величины  $x$ ,  $b$  и  $\psi$

$$\frac{1}{b} \cdot (1 - \psi) = 1 + \left( \frac{1}{x} - 1 \right) \cdot k. \quad (5)$$

Решив его относительно  $x$ , получим

$$x = \frac{b \cdot k}{b \cdot k - b - \psi + 1}. \quad (6)$$

а решение относительно  $b$  дает

$$b = \frac{(1 - \psi) \cdot x}{k \cdot (1 - x) + x}. \quad (7)$$

Обычно, в агломерационной практике, количество возврата определяется непосредственно путем замера расхода возврата взвешиванием в дозировочном отделении.

В некоторых случаях работы постель может отсутствовать, тогда величина  $\psi = 0$  и выражения (7) и (8) упрощаются.

Таким образом, полученные выражения (6) и (7) аналитически связывают коэффициенты  $x$  и  $b$  и позволяют провести анализ аглопроцесса в случае, если один из них известен или задан. Входящая в эти формулы величина  $k$  легко поддается аналитическому определению.

Коэффициент  $k$  – коэффициент выхода твердого остатка из сухих материалов (без возврата), подвергаемых агломерации, легко определяется расчетным путем по известному химическому составу исходных материалов. Этот коэффициент показывает, какая часть исходного материала образует агломерат.

Если обозначить изменение массы  $i$ -го материала при агломерации через  $E_i$  % / %, то для него значение коэффициента выхода твердого остатка выразится как

$$k = \frac{100 - E_i}{100}. \quad (8)$$

Для шихты, состоящей из нескольких компонентов, долевое участие каждого из которых составляет  $a_i$ , относительное изменение массы при агломерации для всей шихты в целом выражается формулой

$$E = \frac{\sum E_i \cdot a_i}{\sum a_i} \quad (9)$$

и общий коэффициент выхода твердого остатка будет равен

$$k = \frac{100 - E}{100} \quad (10)$$

или  $k = 1 - E$ , если  $E$  взято в долях.

В простейшем случае величина  $E_i$ , определяемая по потерям при прокаливании, не в полной мере характеризует действительный выход агломерата из материала. Особенно это имеет место тогда, когда входящие в состав исходных материалов окислы теряют кислород или присоединяют его из газовой фазы.

Агломерированию, в основном, подвергаются железные руды и их концентраты, и в небольших количествах такие добавки, как колошниковая пыль, марганцевая руда и техногенные отходы. В качестве топлива используется коксовая мелочь или угли.

При получении офлюсованных агломератов в качестве флюсов используют известняк.

В процессе спекания этих материалов содержащиеся в них потери при прокаливании, состоящие в основном из  $CO_2$  и  $H_2O$ , удаляются. Кроме этого, в результате химических превращений высших окислов железа и марганца теряется или присоединяется кислород. Улетучивается также и содержащаяся в материалах сера, что также в той или иной мере изменяет массу твердого остатка.

Для основных видов материалов численное значение  $E_i$  можно с достаточной степенью точности определить по формулам:

а) для железных, марганцевых руд и их концентратов, колошниковой пыли, флюсов

$$E_i = CO_2 + H_2O + C + \varphi_S \cdot S + \varphi_{Mn} \cdot Mn + \frac{16}{112} \cdot \left( \alpha \cdot Fe - \frac{56}{112} \cdot FeO \right) \quad (11)$$

б) для твердого топлива его твердым остатком является зола

$$E_i = 100 - A^c \cdot \left\{ 1 - 0,01 \cdot \left[ \varphi_S \cdot S + \varphi_{Mn} \cdot Mn + \frac{16}{112} \cdot \left( \alpha \cdot Fe - \frac{56}{72} \cdot FeO \right) \right] \right\} \quad (12)$$

где  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $C$ ,  $S$ ,  $Mn$ ,  $Fe$ ,  $FeO$  – содержание элементов и соединений в % в материалах и в золе топлива;

$A^c$  – содержание золы в сухом топливе, %;

$\varphi_S$ ,  $\varphi_{Mn}$  и  $\alpha$  – коэффициенты.

В некоторых материалах содержание отдельных соединений или элементов может быть ничтожно мало или равно нулю. Для этих случаев формулы (11) и (12) значительно упрощаются.

Коэффициент  $\alpha$  равен отношению содержания двухвалентного железа и общему его количеству в готовом агломерате. Для большинства аглофабрик, производящих офлюсованный агломерат, это отношение равно 0,2 и колеблется в довольно узких пределах от 0,19 до 0,22.

Изменение твердого остатка любого материала на единицу улетучиваемой из него серы  $\varphi_S$  зависит от типа серных соединений, содержащихся в материале, и схемы превращений этих соединений. В таблице 1 приводятся значения этого коэффициента.

Таблица 1 – Значения коэффициента  $\varphi_S$

Исходное соединение серы	Наименование минерала	Схема превращения	Значение коэффициента $\varphi_S$
FeS	пирротин	$4FeS + 7O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3 + 4SO_2$	0,25
FeS <sub>2</sub>	пирит	$4FeS_2 + 11O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3 + 8SO_2$	0,625
CaS	–	$2CaS + 3O_2 \rightarrow 2CaO + 2SO_2$	0,5
MgS	–	$2MgS + 3O_2 \rightarrow 2MgO + 2SO_2$	0,5
CuFeS <sub>2</sub>	халькопирит	$2CuFeS_2 + 6O_2 \rightarrow$ $\rightarrow Cu_2O + Fe_2O_3 + 4SO_2$	0,71
CaSO <sub>4</sub>	ангидрит	$CaSO_4 \rightarrow CaO + SO_2 + \frac{1}{2}O_2$	2,5
MgSO <sub>4</sub>	–	$MgSO_4 \rightarrow MgO + SO_2 + \frac{1}{2}O_2$	2,5
S	свободная сера	$S + O_2 \rightarrow SO_2$	1,0
MnS	–	$MnS + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow MnO + SO_2$	0,5

Обычно сера присутствует в материалах в нескольких минералах, например в руде КМА (Михайловское рудоуправление) 50 % серы входит в минерал FeS, а 50 % в минерал CaSO<sub>4</sub>. Для золы топлива сера распределяется так: 60 % её связано в соединения FeS, 30 % в CaSO<sub>4</sub> и 10 % CaS. В таких случаях значение коэффициента  $\varphi_S$  подсчитывается как средневзвешенное, например, для золы топлива

$$\varphi_S = 0,6 \cdot 0,25 + 0,3 \cdot 2,5 + 0,1 \cdot 0,5 = 0,95.$$

Вычисленные значения коэффициента  $\varphi_S$  и  $\varphi_{Mn}$  для часто встречающихся в агломерационной практике материалов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения коэффициента  $\varphi_S$  и  $\varphi_{Mn}$  для часто встречающихся в агломерационной практике материалов

Наименование материалов	Соединения серы	$\varphi_S$	$\varphi_{Mn}$
Криворожский концентрат ИнГОК	$CuSO_4$	2,5	0
Криворожская аглоруда р/у Кирова	$CaSO_4$	2,5	0
Михайловская руда КМА 2,5	$FeS, CaSO_4$	1,25	0
Лебединская руда КМА	$FeS, CaSO_4$	1,25	0
Марганцевая руда Никопольская II сорт	$CaSO_4$	2,5	0,247
Известняки	$CaSO_4, S_{своб}$	2,5	0
Колошниковая пыль	$FeS, CaSO_4, S_{своб}$	2,1	0,096
Окалина	$FeS, CaSO_4$	0,25	0
Пиритные огарки	$FeS, CaSO_4, FeS_2$	0,45	0
Зола кокса	$FeS, CaS, CaSO_4$	0,95	0

Коэффициент изменения твердого остатка на единицу содержащегося в исходном материале марганца при превращении высших окислов марганца в низшие ( $\varphi_{Mn}$ ) зависит от того, в какие конечные формы переходят исходные окислы марганца при агломерации. Обычно, содержащиеся в марганцевой руде или колошниковой пыли высшие окислы марганца, при небольших расходах указанных материалов в агломерат переходят в форме  $MnO$ . При больших количествах марганцевых руд в шихте в структуре готового агломерата возможны наряду с  $MnO$  также формы  $Mn_2O_3$  и  $MnFe_2O_4$ .

Вычисленные значения коэффициента  $\varphi_{Mn}$  для различных окислов марганца приведены в таблице 3.

Для случаев, когда в исходном материале марганец присутствует в нескольких видах окислов, коэффициент  $\varphi_{Mn}$  подсчитывается как средневзвешенный.

Например, в Никопольской марганцевой руде 70 % марганца входит в соединение  $MnO_2$  и 30 % – в  $Mn_2O_3$ . Значение коэффициента для этой руды будет составлять

$$\varphi_{Mn} = 0,7 \cdot 0,291 + 0,3 \cdot 0,145 = 0,247.$$

Таблица 3 – Значения коэффициента  $\varphi_{Mn}$  для различных окислов марганца

Исходное соединение марганца	Наименование минерала	Схема превращения	$\varphi_{Mn}$
MnO	манганозит	$MnO \cdot CO_2 \rightarrow MnO$	0
Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	гаусманит	$Mn_3O_4 \rightarrow 3MnO + \frac{1}{2} O_2$	0,097
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	браунит	$Mn_2O_3 \rightarrow 2MnO + \frac{1}{2} O_2$	0,145
MnO <sub>2</sub>	пиролизит	$MnO_2 \rightarrow MnO + \frac{1}{2} O_2$	0,291

Подсчитанное таким образом изменение массы спека при агломерации  $E_i$  по формулам (11) и (12) для часто встречающихся в агломерационной практике материалов приведено в таблице 4.

Таблица 4 – Значение потерь при агломерации  $E_i$

Наименование	Химический состав									$\pm E_i$
	Fe	FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO	Mn	S	C	п.п.п. CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O	$A_{зола}^c$	
Концентрат ИнГОК	64,7	27,2	8,6	0,3	0,26	0,069	-	-	-	- 1,01
Руда Криворожская	57,0	1,0	16,0	0,2	0,24	0,069	-	1,8	-	+ 3,49
Руда КМА, Михайловская	57,0	3,8	10,1	0,6	0,10	0,274	-	4,0	-	+ 5,55
Руда КМА, Лебединская	58,5	3,8	7,2	0,5	0,13	0,28	-	7,2	-	+ 8,80
Николаевская марганцевая руда II сорта	3,2	-	20,5	4,8	38,5	0,080	-	7,2	-	+ 17,00
Известняк	0,29	-	1,5	53,5	-	-	-	43,3	-	+ 43,3
Колошниковая пыль	42,2	13,6	12,8	13,5	0,83	0,344	13,6	1,6	-	+ 15,69
Окалина	71,2	30,6	1,0	0,5	-	-	-	-	-	- 1,37
Пиритные огарки	58,6	4,0	12,0	1,2	0,3	8,2	-	0,5	-	+ 5,82
Топливо (зола)	19,1	-	40,0	5,0	1,51	1,24	-	-	13,4	+ 86,83
Известь	0,3	-	1,8	72,5	-	-	-	23,0	-	+ 23,0

Как видно из таблицы 4, значения  $E_i$  могут быть как положительными, так и отрицательными, т.е. в первом случае масса твердого остатка меньше исходного материала, во втором – больше. Это связано с превращениями окислов железа, которые могут терять кислород, или присоединять его из воздуха.

Найденный таким образом коэффициент выхода твердого остатка из исходных материалов, входящих в шихту, не зависит от содержания в шихте возврата, что делает его удобным для анализа влияния режима возврата на параметры аглопроцесса.

Этот коэффициент зависит лишь от значения химических потерь шихты, что позволяет также производить количественную оценку влияния химического состава исходных материалов на параметры агломерации.

Так, для шихты агломерационной фабрики ПАО «АМК», имеющей состав, приведенный в таблице 5 (в % на сухую массу) общее изменение массы компонентов шихты при агломерации по формуле (11) составит  $E = -14,93\%$ , а общий коэффициент выхода твердого остатка  $k$  по формуле (12) будет равен  $85,07\%$ .

Таблица 5 – Состав шихты агломерационной фабрики ПАО «АМК»

Материал	Содержание материала в шихте
Концентрат ИнГОК	47,2 %
Руда криворожская	22,3 %
Колошниковая пыль	2,1 %
Известняк	19,0 %
Известь	3,3 %
Топливо	6,1 %
Всего	100 %

**Выводы.** Получены зависимости, определяющие связь количества возврата с другими показателями агломерационного процесса.

Коэффициент выхода твердого остатка из шихты определяется химическим составом и значением химических потерь материалов, и не зависит от количества возврата в шихте. Это позволяет производить количественную оценку влияния химического состава исходных материалов на показатели процесса агломерации.

Рассчитанные значения коэффициентов изменения массы наиболее употребляемых материалов при агломерации значительно упрощают расчет показателей аглопроцесса.

#### **Библиографический список**

1. Русаков П.Г. *Обобщенные характеристики ситового состава неоднородного сыпучего материала* / П.Г. Русаков, И.Ф. Русанов // *Заводская лаборатория*. – 1990. – № 2. – С. 15-19.

2. Базилевич С.В. *Агломерация* / С.В. Базилевич, Е.Ф. Вегман. – М: *Металлургия*, 1967. – 368 С.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. Новохатским А.М.*