

д.т.н. Петрушов С.Н.,
к.т.н. Русанов И.Ф., Дорогой Е.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина,
evgeniy.dorogoy@gmail.com)

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ АГЛОУСТАНОВОК В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМА ВОЗВРАТА И НЕКОТОРЫХ ДРУГИХ ПАРАМЕТРОВ ШИХТЫ

Отримано формули, що дозволяють оцінити вплив кількості повернення, вологості шихти і вмісту летючих в шихті на продуктивність аглоустановки.

Ключові слова: повернення, агломераційна шихта, математична модель.

Получены формулы, позволяющие оценить влияние количества возврата, влажности шихты и содержания летучих в шихте на производительность аглоустановки.

Ключевые слова: возврат, агломерационная шихта, математическая модель.

Современная агломерация предопределяет получение двух продуктов – годного агломерата и возврата. Первый продукт имеет крупность более, а второй – менее 5-8 мм. Производительность аглоустановок определяется количеством годного агломерата, произведенного за единицу времени.

Фактическая производительность определяется путем взвешивания годного агломерата. Для определения выхода годного из спека взвешивают и возврат.

В проектных расчетах и при анализе работы аглоустановок для расчета суточной производительности Q используются формулы различного вида, одна из которых имеет вид [1]:

$$Q = 14,4 \cdot S \cdot V \cdot \gamma \cdot K, \text{ т/сутки} \quad (1)$$

где S – площадь спекания аглоустановки, м^2 ;

V – вертикальная скорость спекания, м/мин ;

γ – насыпная масса шихты, т/м^3 ;

K – коэффициент выхода годного агломерата из шихты, %.

Входящие в эти формулы величины (кроме S) зависят от параметров процесса агломерации, вещественного состава шихты и режима возврата, и для конкретных условий определяются экспериментально или расчетным путем.

Так, вертикальная скорость спекания шихты и ее насыпная масса для большинства шихт линейно зависят от содержания возврата в шихте (для определенного интервала его содержания в шихте) [1]

$$V = V_0 + a\varphi \quad \text{и} \quad \gamma = \gamma_0 + b\varphi, \quad (2)$$

где V_0 и γ_0 – вертикальная скорость спекания и насыпная масса шихты без возврата, соответственно;

φ – содержание возврата в сухой шихте;
 a и b – коэффициенты пропорциональности.

В первом приближении можно принять, что коэффициент K (выход годного из шихты) также линейно зависит от содержания возврата в шихте

$$K = K_0 - c\varphi. \quad (3)$$

С учетом приведенных зависимостей формула (1) примет вид

$$Q = 14,4 \cdot F \cdot (\gamma_0 + b\varphi) \cdot (V_0 + a\varphi) \cdot (K_0 - c\varphi). \quad (4)$$

После преобразования получим

$$Q = 14,4 \cdot F \cdot \left[\begin{aligned} & -abc\varphi^3 + (K_0ab - bcV_0 - ac\gamma_0)\varphi^2 + \\ & + (K_0bV_0 + K_0a\gamma_0 - c\gamma_0V_0) \cdot \varphi + K_0\gamma_0V_0 \end{aligned} \right] = \quad (5)$$

$$= 14,4 \cdot F \cdot [A_1\varphi^3 + A_2\varphi^2 + A_3\varphi + A_4].$$

Таким образом, зависимость производительности установки от содержания возврата в шихте выражается функцией третьей степени. График этой функции имеет

сложный вид и определяется значениями коэффициента a и $\Delta = 3ac - b^2$ [2]. Как показал анализ, для данной зависимости $a < 0$ и $\Delta < 0$, что свидетельствует о том, что функция имеет максимум в реальном диапазоне изменения содержания возврата в шихте.

Адекватность уравнения (5) фактическим данным определяется тем, насколько зависимости (2) и (3) близки к линейным в одном и том же интервале изменения величины φ – содержания возврата в шихте.

Использование уравнения (5) для количественной оценки производительности затруднено, т.к. коэффициенты a , b , c , γ_0 , V_0 , K_0 изменяются в зависимости от состава шихты и условий спекания агломерата и в каждом конкретном случае требуют индивидуального определения опытным путем.

В связи с этим предлагается следующий способ построения аналитических формул, учитывающий влияние на производительность не только содержания возврата в шихте, но и ряда других факторов.

С целью исключения влияния площади спекания аглоустановки на производительность и для сравнения работы установок с разной площадью спекания обычно рассчитывается ее удельная производительность. Она определяется количеством годного агломерата или спека, полученным с единицы площади спекания за единицу времени.

Если за время τ на установке площадью спекания S получено G спека или Γ годного агломерата, то удельные производительности по выходу спека p' и выходу годного p ($t/m^2 \cdot \text{час}$) рассчитываются по формулам

$$p' = \frac{G}{\tau \cdot S} \quad \text{и} \quad p = \frac{\Gamma}{\tau \cdot S}. \quad (6)$$

Общая масса загружаемых в аглоустановку материалов включает массы сухих шихтовых материалов Ш , возврата B , постели П и количество воды q в шихте, равное количеству гигроскопической влаги в ней и добавляемой в нее воды для ее увлажнения до оптимальной влажности

w , %. После спекания из этой массы материалов, как показано в работе [3], будет получен спек в количестве, равном G

$$G = \text{Ш} \cdot K + G \cdot b + G \cdot \psi, \quad (7)$$

где b и ψ – доли возврата и постели, выделенных из спека.

С другой стороны, количество полученного спека равно

$$G = B + \text{П} + \Gamma \quad \text{или} \quad G = G \cdot b + G \cdot \psi + \Gamma. \quad (8)$$

Из уравнения (8) $\Gamma = G \cdot (1 - b - \psi)$ и тогда с учетом формул (6)

$$p = p' \cdot (1 - b - \psi). \quad (9)$$

По количеству материала, загруженного в установку (без учета загруженной постели) и его объему $S \cdot h_{\text{Ш}}$, если высота слоя шихты равна $h_{\text{Ш}}$, может быть определена насыпная масса шихты

$$\gamma = \frac{\text{Ш} + B + q}{S \cdot h_{\text{Ш}}} = \frac{\text{Ш} + G \cdot b + q}{S \cdot h_{\text{Ш}}}. \quad (10)$$

Содержание воды в рабочей массе шихты (ее влажность) будет равна

$$w = \frac{q}{\text{Ш} + B + q} = \frac{q}{\text{Ш} + G \cdot b + q}. \quad (11)$$

Подставив значение Ш из (7) в выражения (10) и (11) получим

$$\gamma = \frac{\frac{G}{K} \cdot (1 - b - \psi) + Gb + q}{S \cdot h_{\text{Ш}}}, \quad (12)$$

$$w = \frac{q}{\frac{G}{K} \cdot (1 - b - \psi) + Gb + q}. \quad (13)$$

Найдя из выражения (13) величину q и подставив её в выражение (12) находим величину $h_{\text{Ш}}$

$$h_{\text{Ш}} = \frac{1}{S \cdot \gamma} \cdot \left[1 + \frac{w}{1 - w} \right] \cdot \left[\frac{G}{K} \cdot (1 - b - \psi) + Gb \right]. \quad (14)$$

Время спекания шихты при известной скорости спекания V определяется из со-

отношения $\tau = \frac{h_{III}}{V}$. С учетом определенной по формуле (14) высоты слоя шихты

$$\tau = \frac{1}{S \cdot \gamma \cdot V} \cdot \left[1 + \frac{w}{1-w} \right] \cdot \left[\frac{G}{K} \cdot (1-b-\psi) + Gb \right]. \quad (15)$$

Подставив в выражение (6), определяемое по формуле (15) значение τ и найденное ранее значение G получим формулу для расчета производительности

$$p = \frac{K \cdot (1-b-\psi)}{\left[1-\psi - b \cdot (1-K) \right] \cdot \left(1 + \frac{w}{1-w} \right)} \cdot \gamma_{ш} \cdot V. \quad (16)$$

В полученном выражении (16) обозначим дробь через K^a , т.е.

$$\frac{K \cdot (1-b-\psi)}{\left[1-\psi - b \cdot (1-K) \right] \cdot \left(1 + \frac{w}{1-w} \right)} = K^a. \quad (17)$$

Тогда удельная производительность аглоустановки будет равна

$$p = K^a \cdot \gamma \cdot V. \quad (18)$$

Полученные выражения можно представить несколько в ином виде

$$K^a = (1-w) \cdot (1-E) \cdot (1-\varphi), \quad (19)$$

$$p = (1-w) \cdot (1-E) \cdot (1-\varphi) \cdot \gamma \cdot V, \quad (20)$$

где E – изменение массы материалов в результате физико-химических процессов при агломерации.

Формула (20) не только позволяет определить удельную производительность аглоустановки, но и отражает последовательность процессов, протекающих от загрузки шихты до получения годного агломерата:

а) количество загружаемой в единицу времени на единицу площади спекания рабочей массы шихты равно $\gamma \cdot V$, т/м²·час;

б) после загрузки происходит процесс высушивания шихты, т.е. удаления из нее воды. После высушивания сухой остаток составит

$$(V \cdot \gamma) \cdot (1-w), \text{ т/м}^2 \cdot \text{час.}$$

в) поскольку возврат является обратным продуктом, то собственно шихты без возврата в сухом остатке будет

$$V \cdot \gamma \cdot (1-w) \cdot (1-\varphi), \text{ т/м}^2 \cdot \text{час.}$$

г) в ходе спекания масса исходных шихтовых материалов (без возврата) изменяется в результате протекания физико-химических процессов, и тогда оставшийся твердый остаток составит

$$V \cdot \gamma \cdot (1-w) \cdot (1-\varphi) \cdot (1-E), \text{ т/м}^2 \cdot \text{час.}$$

Полученные формулы позволяют выявлять и оценивать влияние на производительность аглоустановок не только режима возврата, но и других свойств аглошихты, таких как ее влажность и наличие в ней потерь при агломерации.

Вышеприведенные формулы позволяют получить ряд других производных, позволяющих определять некоторые параметры процесса агломерации.

Так, например, из выражения (18) следует, что $K^a = \frac{p}{\gamma \cdot V}$.

Подставив сюда значение p и K^a , определяемые соответственно по формулам (9) и (17), получим равенство

$$\frac{p' \cdot (1-\psi - b)}{\gamma \cdot V} = \frac{K \cdot (1-\psi - b)}{\left[1-\psi - b \cdot (1-K) \right] \cdot \left(1 + \frac{w}{1-w} \right)}.$$

Откуда

$$b = \frac{1-\psi - \frac{K \cdot V \cdot \gamma}{p' \cdot \left(1 + \frac{w}{1-w} \right)}}{1-K}. \quad (21)$$

Как установлено многими исследованиями, режим возврата в процессе агломерации влияет на свойства как самой шихты, изменяя ее оптимальную влажность, объемный вес, так и на ход процесса спекания через газопроницаемость шихты и вертикальную скорость спекания. При этом, как указывалось выше, в определенном интервале изменения содержания возврата в шихте вертикальная скорость спекания и насыпная масса шихты зависят от

содержания возврата в шихте линейно. Известно также, что и оптимальная влажность шихты уменьшается линейно с увеличением содержания в ней возврата.

С учетом сказанного уравнение (20) может быть записано в следующем виде

$$p = [1 - (w_0 + d \cdot \varphi)] \cdot [1 - E] \cdot [1 - \varphi] \cdot [\gamma_0 + b \cdot \varphi] \cdot [V_0 + a \cdot \varphi],$$

где a, b, d – коэффициенты.

Проведя соответствующие преобразования и упрощения, получим

$$p = (1 - E) \cdot (B_1 \cdot \varphi^4 + B_2 \cdot \varphi^3 + B_3 \cdot \varphi^2 + B_4 \cdot \varphi + B_5), \quad (22)$$

где B_1 – B_5 – комплексные коэффициенты.

Полученное уравнение указывает на многогранное и разностороннее влияние возврата на процесс агломерации, определяющее его производительность.

Таким образом, производительность аглоустановки в функции содержания возврата в шихте представляется в более общем и расширенном виде полным уравнением четвертой степени, позволяющем найти его экстремумы и определить содержание возврата, обеспечивающее максимальную производительность.

Рассчитаем некоторые показатели процесса агломерации применительно к спеканию аглошихты в лабораторной чаше.

Агломерации подвергалась шихта, состоящая из 23,0 % возврата и 77,0 % исходных спекаемых материалов (состав по сухому весу), т.е. величина $\varphi = 0,23$, а компонентный состав спекаемых материалов возьмем из [3].

Влажность аглошихты, загружаемой в чашу – 7,3 %, т.е. $w = 0,073$, а высота слоя (без постели) составляет 260 мм.

Диаметр чаши, в которой производится спекание, 104 мм (площадь 0,0082 м²), а объем, занимаемый шихтой (без постели) в чаше равен $0,0082 \cdot 0,26 = 0,00214$ м³.

В процессе спекания фиксировались:

– вес загружаемой постели – 0,189 кг;

– вес загружаемой шихты в рабочем состоянии – 3,70 кг;

– вес получаемого спека – 3,20 кг;

– время спекания – 8,5 мин. или 0,141 часа.

На основании полученных данных находим вертикальную скорость спекания

$$V = \frac{h_{ш}}{\tau} = \frac{0,260}{0,141} = 1,84 \text{ м/час или}$$

$$\frac{0,260 \cdot 1000}{0,141 \cdot 60} = 31,7 \text{ мм/мин.}$$

насыпной вес шихты

$$\gamma = \frac{3,70 \cdot 10^{-3}}{0,00214} = 1,73 \text{ т/м}^3.$$

производительность по спеку

$$p' = \frac{3,22 \cdot 10^{-3}}{0,141 \cdot 0,0082} = 2,77 \text{ т/м}^2 \cdot \text{час.}$$

выход постели от спека

$$\Pi = \frac{0,189}{3,20} = 0,059 \text{ или } 5,9 \%.$$

Коэффициент выхода твердого K из исходных материалов подсчитан ранее [3] и составляет 0,8507, а $E = 1 - 0,8507 = 0,1493$.

Выход возврата от спека по формуле из [3].

$$b = \frac{(1 - \psi) \cdot \varphi}{K \cdot (1 - \varphi) + \varphi} = \frac{(1 - 0,059) \cdot 0,23}{0,8507 \cdot (1 - 0,23) + 0,23} = 0,245 \text{ или } 24,5 \%.$$

а по формуле (21)

$$b = \frac{1 - \psi - \frac{K \cdot V \cdot \gamma_{ш}}{p' \cdot \left(1 + \frac{w}{1 - w}\right)}}{1 - K} = \frac{1 - 0,059 - \frac{0,8507 \cdot 1,84 \cdot 1,73}{2,77 \cdot \left(1 + \frac{0,073}{1 - 0,073}\right)}}{1 - 0,8507} = 0,245 \text{ или } 24,5 \%.$$

Производительность по формуле (20) будет равна

$$p = (1 - w) \cdot (1 - E) \cdot (1 - \varphi) \cdot \gamma \cdot V = (1 - 0,073) \cdot (1 - 0,1493) \cdot (1 - 0,23) \cdot 1,73 \cdot 1,84 = 1,93 \text{ т/м}^2 \cdot \text{час.}$$

Производительность установки по годно-

му агломерату, используя вышеприведенные экспериментальные данные, можно рассчитать также следующим образом.

Если вес загруженной шихты в рабочем состоянии равен 3,70 кг, а ее влажность 7,3 %, то количество сухого будет равно

$$3,70 \cdot \frac{100 - 7,3}{100} = 3,43 \text{ кг.}$$

Количество возврата, израсходованного на спекание, будет равно

$$3,43 \cdot \varphi = 3,43 \cdot 0,23 = 0,790 \text{ кг.}$$

Производительность по годному составу

$$p = \frac{2,221 \cdot 10^{-3}}{0,141 \cdot 0,0082} = 1,93 \text{ т/м}^2 \cdot \text{час.}$$

Иногда возникает необходимость определить коэффициент выхода твердого остатка К или потерь при агломерации Е не прибегая к химическому анализу исходных материалов. Для чего достаточно вос-

пользоваться формулой (20), преобразовав ее

$$1 - E = K = \frac{p}{(1 - w) \cdot (1 - \varphi) \cdot \gamma \cdot V} = \frac{1,93}{(1 - 0,073) \cdot (1 - 0,23) \cdot 1,73 \cdot 1,84} = 0,8507.$$

Выводы.

1. Полученные формулы дают математическое описание некоторых сторон агломерационного процесса и позволяют качественно и количественно оценить влияние таких параметров, как количество возврата, влажность шихты, содержание летучих в шихте на производительность аглоустановки.

2. Для расчета большинства характеристик аглопроцесса достаточно определить экспериментально лишь некоторые из них, а остальные можно рассчитать аналитическим путем, используя приведенные выше зависимости.

Библиографический список

1. Базилевич С.В. *Агломерация* / С.В. Базилевич, Е.Ф. Вегман. – М.: Металлургия, 1967. – 368 с.
2. Бронштейн И.Н. *Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов* / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
3. Петрушов С.Н. *Аналитическое определение выхода возврата и твердого остатка при производстве агломерата* / Петрушов С.Н., Русанов И.Ф., Дорогой Е.В. // *Сборник научных трудов ДонГТУ*. – 2012. – № 38. – С. 89-96.

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