

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАВИСИМОСТИ ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТИ ШИХТЫ ОТ ЕЕ ВЛАЖНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА АГЛОМЕРАТА

Е.А. Алёшин

MATHEMATICAL MODEL OF A CHARGE GAS PERMEABILITY FUNCTION FROM ITS MOISTURE IN THE AGGLOMERATE PRODUCTION

E.A. Aleshin

Рассматривается задача автоматизации процесса увлажнения шихты. Методами множественного регрессионного и корреляционного анализа строится математическая модель зависимости газопроницаемости слоя шихты от ее влажности. Находится выражение для оптимальной влажности шихты.

Ключевые слова: газопроницаемость шихты, производство агломерата.

The problem of automating the process of moistening the charge is under consideration. Using the methods of multiple regression and correlation analysis, a mathematical model of the dependence of gas permeability of the layer charge of its moisture is built. An expression for the optimum moisture content of the charge has been found.

Keywords: charge gas permeability, agglomerate production.

Важным этапом в производстве агломерата является процесс увлажнения шихты (исходного сырья) для достижения её оптимальной газопроницаемости с целью увеличения производительности агломерационных машин и повышения качества агломерата (готового продукта). Газопроницаемость шихты в сильной степени зависит от ее абсолютной влажности. Для материала данного минералогического и гранулометрического состава существует только одно оптимальное значение влажности, которое с возможной степенью точности необходимо поддерживать вручную или автоматически.

В производственных условиях влажность шихты колеблется в широких пределах из-за, например, изменений давления воды в водопроводе и изменений массы шихты, проходящей через барабан-окомкователь в единицу времени. Кроме того, постоянно меняется минералогический и гранулометрический составы сырья, а вместе с ними и величина оптимальной влажности шихты, соответствующей максимальной газопроницаемости.

1. Задача автоматизации процесса увлажнения шихты

В настоящее время увлажнение шихты перед загрузкой на спекательные тележки на всех четы-

рёх агломерационных машинах аглофабрики № 2 ОАО «ЧМК» ведется в ручном режиме. Достаточная степень увлажнения определяется технологами «на глаз» и «на ощупь», исходя из личного опыта. Поэтому необходима автоматическая система управления влажностью, которая должна не только с большой частотой определять абсолютную влажность шихты, но и должна также с помощью электронного оптимизатора находить новое значение оптимальной влажности, характерное для спекаемой в данный момент шихты.

Для автоматизации процесса увлажнения шихты и повышения качества агломерата необходимо, в первую очередь, найти математическую зависимость газопроницаемости слоя шихты от влажности шихты. Вычисляя максимум этой функции (газопроницаемости) в зависимости от параметра (влажности), можно определить оптимальное значение влажности. Однако, оптимальное значение влажности разное для различных температур шихты перед спеканием. Поэтому газопроницаемость следует рассматривать как функцию двух переменных – влажности и температуры шихты. Значит, задаваясь конкретным значением температуры, можно найти оптимальное значение влажности, соответствующее максимуму газопроницаемости.

2. Математические методы определения газопроницаемости шихты

Из теории процесса агломерации [1] известны математические формулы, позволяющие найти газопроницаемость шихты расчетным путем. Например, газопроницаемость слоя агломерационной шихты на колосниковой решетке может быть вычислена по формуле Л.К. Рамзина

$$W = n \sqrt{\frac{\Delta p}{A h}}, \quad (1)$$

где W – количество воздуха на 1 м² площади; Δp – разрежение, мм вод. ст.; h – высота слоя шихты, мм; A , n – коэффициенты, зависящие от размера и формы частиц шихты.

Трудности использования формулы (1) применительно к слою спекаемой руды заключаются в том, что характер поверхности частиц и скорость воздуха в слое оказывают сильное влияние на величину коэффициентов A и n . В силу этого реальные потери напора в слое шихты иногда существенно отличаются от расчетных.

Производным от формулы Л.К. Рамзина является уравнение Е. Войса, С. Брукса и П. Гледхила, позволяющее определить коэффициент условной газопроницаемости (p) слоя высотой (h) по расходу газа (V), площади всасывания (F), потере напора в слое (Δp):

$$p = \frac{V}{F} \left(\frac{h}{\Delta p} \right)^{n_1}, \quad (2)$$

где $n_1 = 1/n$ меняется практически в пределах от 0,6 до 0,8.

К сожалению, даже небольшие по величине изменения величины n_1 существенно сказываются на расчетной газопроницаемости слоя шихты, что также затрудняет использование формулы (2).

По Р. Уайльду и К. Диксону, количество воздуха, просасываемого через слой в секунду (W), может быть вычислено по коэффициенту условной газопроницаемости (p), вакууму (Δp) и высоте слоя (h) из выражения

$$W = p \Delta p^{0,6} / h^{0,4} \quad (3)$$

При постоянной высоте слоя количество воздуха (W) связано с вакуумом (Δp) зависимостью

$$W = A (\Delta p)^m, \quad (4)$$

здесь A – постоянная, характерная для шихты данного типа, а показатель m равен 0,435; 0,4–0,45; 0,45.

Приведенные выше зависимости (1)–(4) не дают возможности выявить влияние каждой из зон в спекаемом слое на общую газопроницаемость слоя. Поэтому на практике, в производственных условиях расчет газопроницаемости шихты по формулам (1)–(4) не находит широкого применения из-за низкой точности и универсальности данного метода.

3. Статистический метод расчета газопроницаемости шихты

На аглофабрике № 2 постоянно и непрерывно фиксируется (каждые две секунды) значения всех важнейших технологических параметров процесса производства агломерата. Данная технологическая информация записывается в базу данных и сохраняется (со сроком хранения не менее четырех лет). Представляется целесообразным провести анализ этой накопленной статистической информации с целью установления зависимостей изменения газопроницаемости слоя спекаемой шихты при различных значениях влажности шихты, а на основе выявленных статистических закономерностей разработать логическую часть системы управления влажностью. Огромный объем накопленных статистических данных обоснованно позволяет предположить высокую точность при использовании данного метода. Таким образом, статистический метод в сложившихся условиях представляется наиболее предпочтительным.

Газопроницаемость слоя шихты оборудованием аглопроизводства напрямую не определяется и, соответственно, нигде не фиксируется. Поэтому необходимый параметр – газопроницаемость требуется установить косвенным путем, используя для этого другие параметры техпроцесса, которые измеряются, фиксируются и сохраняются.

Лучше всего изменения газопроницаемости могут быть охарактеризованы через изменения разрежения над слоем и под слоем шихты, если рассматривать их одновременно. Кроме того, необходимо учесть, что для разных температур шихты существует своё оптимальное значение влажности. Исходя из этого, газопроницаемость можно рассматривать как функцию трёх переменных – температуры шихты (в промбункере), разрежения над слоем шихты (разрежение под укрытием первым) и разрежения под слоем шихты (разрежение в вакуум-камере либо разрежение в общем коллекторе). Сопротивление слоя шихты потоку проходящих через него газов – это величина, обратная газопроницаемости. Таким образом, с помощью измерений разрежений над и под слоем шихты косвенным способом можно определить газопроницаемость.

Произведя замену одного параметра – газопроницаемости слоя на два других, связанных с ним параметра, – разрежения над слоем и под слоем, получаем функцию трех переменных. Учитывая, что температура шихты, влажность шихты, разрежение под слоем шихты (создается эксгаустером) являются независимыми параметрами, а разрежение над слоем – зависимый от них параметр, получаем функцию – разрежение над слоем, зависимую от трех параметров – температуры, влажности, разрежения под слоем в контрольной точке (разрежение в вакуум-камере). Так как газопроницаемость, с другой стороны, есть функция влажности, для практического использования дос-

таточно построить зависимости разряжения над слоем от разряжения в общем коллекторе, от температуры шихты (в промбункере) и от влажности шихты. Данную зависимость уже можно непосредственно использовать в системе автоматического регулирования влажности.

После усреднения значений технологических параметров в десятиминутных интервалах и предварительной обработки опытных данных (отсев грубых погрешностей измерений [2]) получаем выборку, состоящую из 136 наблюдений, по четыре параметра в каждом наблюдении. В качестве зависимой переменной y синтезируемой математической модели выступает давление под первым укрытием, а в качестве независимых параметров x_1, x_2, x_3 температура шихты, итоговая влажность, давление в вакуум-камере.

Для применения статистических методов построения эмпирических зависимостей очень важно, чтобы результаты наблюдений подчинялись нормальному закону распределения [3]. Проверка исходных данных по методу среднего абсолютного отклонения и методу анализа коэффициентов асимметрии и эксцесса [2] показала, что исходные выборки подчиняются нормальному закону распределения.

Теоретические исследования [1] показывают, что зависимость влажности шихты от ее газопроницаемости носит нелинейный характер, поэтому для построения математической модели применяем нелинейный множественный регрессионный анализ [3]. На первом этапе строим (методом наименьших квадратов) полное кубическое уравнение регрессии с 21 эффектом вида

$$\begin{aligned} y_M = & b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + \\ & + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{111}x_1^3 + b_{222}x_2^3 + b_{333}x_3^3 + \\ & + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \dots, \\ y_M = & -122,93 + 45,31x_1 - 679,42x_2 - 32,39x_3 - \\ & - 4,931x_1x_2 + 0,467x_1x_3 - 3,807x_2x_3 + 0,147x_1^2 + \\ & + 65,66x_2^2 - 0,328x_3^2 - 0,0052x_1x_2x_3 + \\ & + 0,051x_1^2x_2 - 0,0018x_1^2x_3 - 0,062x_2^2x_1 + \\ & + 0,411x_2^2x_3 + 0,0013x_3^2x_1 + 0,0085x_3^2x_2 - \\ & - 0,0065x_1^3 - 0,1x_2^3 - 0,00065x_3^3. \end{aligned} \quad (5)$$

Однако проверка значимости коэффициентов модели показывает, что не все коэффициенты являются значимыми.

На втором этапе для подбора оптимальной структуры модели осуществлен 5-ступенчатый отсев незначимых эффектов (методом исключения переменных [3]), в процессе которого было исключено 13 статистически незначимых эффектов, в результате получена модель с 8 эффектами:

$$\begin{aligned} y_M = & 311,93 + 3,73x_1 - 53,69x_2 + 2,88x_3 + \\ & + 0,023x_1x_2x_3 + 0,111x_1x_2^2 - 0,053x_2^2x_3 + \\ & + 0,00071x_1x_3^2. \end{aligned} \quad (6)$$

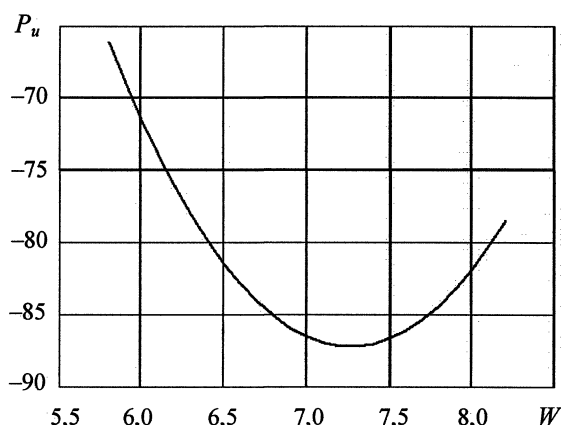
После переобозначения параметров в соответствии с их физическим смыслом уравнение (6) принимает вид

$$\begin{aligned} P_u = & 311,93 + 3,73T - 53,69W + 2,88P_{vk} + \\ & + 0,023TW P_{vk} + 0,111TW^2 - \\ & - 0,053W^2 P_{vk} + 0,00071TP_{vk}^2, \end{aligned} \quad (7)$$

где P_u – давление (разряжение) под укрытием; T – температура шихты; W – влажность шихты перед спеканием; P_{vk} – давление (разряжение в вакуум-камере).

Доверительные интервалы для коэффициентов последней модели показывают их значимость; коэффициент множественной корреляции $R = 0,936$ близок к единице; значимость коэффициента множественной корреляции подтверждается критерием Фишера $F_R = 129,98 > F_T = 3,265$; критерий Фишера показывает адекватность модели в целом. Таким образом, полученную математическую модель можно применять для дальнейших исследований.

График зависимости P_u от W при фиксированных параметрах $T = 35^\circ\text{C}$ и $P_{vk} = -113$ (середины диапазонов изменения) показан на рисунке.



Зависимость давления под укрытием от влажности при фиксированных параметрах $T = 35^\circ\text{C}$ и $P_{vk} = -113$

4. Определение оптимальной влажности

Как следует из рисунка, зависимость имеет одну экстремальную точку (минимум), в которой разряжение под укрытием максимально, что хорошо согласуется с теорией агломерации [1]. Максимальному разряжению соответствует оптимальная влажность шихты W_0 при данной температуре и разряжении в вакуум-камере.

Точки оптимальной влажности при разных температурах и разряжениях в вакуум-камере можно найти, если взять первую частную производную от зависимости (7) по параметру влажности и приравнять её к нулю:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_u}{\partial W} = & -53,69 + 0,023TP_{vk} + \\ & + 0,222TW - 0,106WP_{vk} = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Откуда находим выражение для оптимальной влажности

$$W_o = \frac{53,69 - 0,023TP_{vk}}{0,222T - 0,106P_{vk}} \quad (9)$$

Выражение (9) является уравнение оптимальной влажности, зависящей от двух параметров – температуры и разряжения в вакуум-камере. Последнее выражение можно непосредственно закладывать в алгоритм автоматического оптимального управления влажностью шихты.

Литература

- 1 Вегман, Е.Ф. Теория и технология агломерации / Е.Ф. Вегман. – М.: Металлургия, 1974.
- 2 Львовский, Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е.Н. Львовский. – М.: Высшая школа, 1988. – 239 с.
3. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Статистика, 1973 – 392 с.

Поступила в редакцию 18 сентября 2007 г.