

УДК 669.337

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ГРАНУЛ ЧЕРНОВОГО МЕДНО-МОЛИБДЕНОВОГО КОНЦЕНТРАТА МЕСТОРОЖДЕНИЯ «ТАСТАУ»

© 2013 г. Л.М. Каримова

Химико-металлургический институт, г. Караганда, Респ. Казахстан

Приведены результаты исследования статической прочности окатышей черного медно-молибденового концентрата месторождения «Тастау», гранулированного на растворе лигносульфонатов (сульфит-спиртовая барда с $\rho = 1,05 \text{ г/см}^3$), с использованием метода математического планирования эксперимента. Изучено влияние температуры, продолжительности сушки, расхода воздуха и размера гранул на изучаемые характеристики. Получена энергостохастическая модель статической прочности гранул концентрата. Установлено, что высота слоя при заполнении в различные бункеры для среднего диаметра гранул 8 мм не должна превышать 12 м.

Ключевые слова: гранулы, медно-молибденовый концентрат, статическая прочность, эффективное поверхностное натяжение.

Using mathematical planning of experiments, the results of studies concerned with the static strength of crude copper and molybdenum concentrate pellets from the «Tastau» deposit have been obtained; the concentrate is granulated in lignosulfonate solution (spent sulfite-alcohol liquor $\rho = 1,05 \text{ g/cm}^3$). The effect of temperature, drying time, air flow, and grain size on the examined characteristics has been studied. An energy-stochastic model of the static strength of concentrate granules is developed. It is found the height of layer when filling in different bins for average granule diameter of 8 mm must not exceed 12 m.

Key word: granules, copper-molybdenum concentrate, static strength, efficient surface tension.

Механическое разрушение окатышей приводит к повышенному пылевыносу, потерям ценных компонентов и нарушению в целом процесса обжига. Поэтому большое значение имеет получение гранул, прочностные характеристики которых позволяют выдерживать нагрузки, возникающие при транспортировке и перегрузках, а также при переработке в обжиговой печи. Для решения этой задачи требуется изучить условия изготовления прочных окатышей.

Были исследованы гранулы, полученные из черного медно-молибденового концентрата с 75 %-ным содержанием класса —0,074 мм. Химический состав концентрата следующий, %: 7,91 Cu; 9,51 S; 15,15 Fe; 12,58 CaO; 0,82 Na₂O; 2,07 K₂O; 28,76 SiO₂; 7,90 Al₂O₃; 0,13 Mo.

Концентрат окатывали на лабораторном грануляторе с диаметром чаши 0,4 м, высотой борта 0,15 м при скорости вращения 20 об/мин и подаче связующего разбрызгиванием. Концентрация раствора лигносульфоната, составляющая 1,05 г/см³, была в

2 раза меньше, чем используется в практике медеплавильных заводов.

Для определения оптимальных условий сушки гранул были проведены опыты на основе математического планирования эксперимента по методу [1]. Изучали влияние температуры, продолжительности сушки, расхода воздуха, размера гранул. Условия и результаты опытов представлены в табл. 1.

Для исследований применяли специально предназначенную для этой цели установку, включающую электрокалорифер, компрессор, ротаметр и рабочую ячейку с решетчатым дном, а также термомпары и вторичные приборы. Навеску влажных гранул помещали в ячейку, в которую снизу вдували нагретый воздух с заданной объемной скоростью. По окончании опыта гранулы извлекали из ячейки, взвешивали, досушивали при температуре 105 °С и вновь взвешивали. Для определения выхода целых гранул в каждом независимом опыте путем наложения фиксированной нагрузки отбирали по 20 окатышей. Полученные результаты по статической

Каримова Л.М. – канд. хим. наук, вед. науч. сотр. Химико-металлургического института, ТОО «Инновация» (100009, Респ. Казахстан, г. Караганда, ул. Ермакова, 63). E-mail: lutsia.08@mail.ru.

Таблица 1

Зависимость экспериментальных (ε) и рассчитанных по обобщенному уравнению значений изучаемых функций (W_1 , ρ_c , P_c) от температуры сушки (t), ее продолжительности (τ), размера гранул (d), расхода вдуваемого воздуха (V)

Изучаемый фактор		W_1^{ε} , %	ρ_c^{ε} , Дж/м ²	$\rho_c(3)$, Дж/м ²	P_c^{ε} , д. е.	$P_c(4)$, д. е.
t , °С ($\tau = 30$ мин, $V = 60$ см ³ /с, $d = 10$ мм)	50	9,85	742,47	770,20	0,10	0,15
	100	10,68	766,83	796,35	0,15	0,22
	150	11,78	763,59	822,50	0,14	0,28
	190	11,69	784,23	843,42	0,19	0,34
	210	12,14	846,31	853,88	0,35	0,37
τ , мин ($t = 100$ °С, $V = 60$ см ³ /с, $d = 10$ мм)	5	4,64	703,65	728,11	0,042	0,075
	10	7,46	733,1	753,78	0,083	0,12
	15	8,78	774,17	769,23	0,17	0,15
	30	10,68	766,83	796,35	0,15	0,22
	40	11,79	752,75	807,89	0,12	0,24
	60	11,87	828,86	824,44	0,304	0,29
d , мм ($t = 100$ °С, $V = 60$ см ³ /с, $\tau = 30$ мин)	5	9,46	1515,6	1314,19	0,13	0,008
	8	10,55	932,81	1003,49	0,11	0,23
	10	10,68	766,83	796,35	0,15	0,22
	12	11,74	755,19	589,21	0,25	0,046
V , см ³ /с ($t = 100$ °С, $\tau = 30$ мин, $d = 10$ мм)	20	11,38	754,19	—	0,125	—
	40	11,43	708,70	—	0,047	—
	60	10,68	766,83	—	0,15	—
	80	11,59	699,39	—	0,037	—
	100	11,55	737,47	—	0,091	—

прочности выхода целых гранул (P_c^{ε}) представлены в табл. 1.

Особенность проведения эксперимента обусловлена спецификой химического и фазового составов концентрата, содержащих сульфиды, сульфаты и оксиды металлов. При орошении концентрата водой на стадии гранулирования образуются гидратированные молекулы сульфидов и сульфатов металлов. Гранулы, полученные из исследуемых концентратов, содержат и влагу (несвязанную воду), которая находится в капиллярах, образованных частицами пыли внутри гранул, и химически связанную (конституционную) воду. Причем эти две характеристики сопоставимы друг с другом по величине.

Соединения металлов, содержащиеся в составе воды, разлагаются в широком диапазоне температур, в том числе и при $t < 105$ °С. Например, $ZnSO_4 \cdot 6H_2O$ теряет 5 молекул воды при $t = 70$ °С. Поэтому величины предельной относительной убыли массы влажных гранул, определяемые при той или иной температу-

ре, не являются влажностью в общепринятом смысле этого слова. Как правило, содержание химически связанной воды не учитывается в практике сушки при нахождении влажности исследуемого образца. В то же время наличие значительных количеств химически связанной воды может привести к разрушению гранул в процессе их последующего обжига. Попадая в зону повышенных температур, они будут «взрываться» за счет интенсивного выделения воды разлагающихся кристаллогидратов.

Цель исследований заключалась в изучении статической прочности окатышей из чернового медно-молибденового концентрата.

Статическая прочность (P_c), она же выход целых гранул (в долях единицы) при статической нагрузке, рассчитывалась по вероятностной формуле энерго-стохастической прочности [2]:

$$P_c = 0,5^{[2G/(nd\rho_c)]^6}, \quad (1)$$

где G — прилагаемая сила нагрузки, Н; d — размер

(диаметр) гранулы, m , ρ_c — эффективное поверхностное натяжение, или энергия поверхности разрушения при статической нагрузке, $H/m = Дж/м^2$.

Эта формула основана на вероятностном характере разрушения под действием любых нагрузок (статических, ударных, термических), в результате чего вероятность разрушения связывается с долей разрушенного материала, а вероятность сохранности — с долей оставшегося целым. Физическая сущность энергостохастической прочности непосредственно связывается с энергией вновь образованной поверхности разрушенного материала (в размерности $Дж/м^2$), или с тождественно равной ей силе поверхностного натяжения (H/m). Этой энергии противопоставляется соответствующая энергия нагрузки, и их соотношением определяется увеличение или уменьшение выхода разрушенных или целых кусков.

Поверхностное натяжение при воздействии статической нагрузки вычисляли по формуле, обратной (1):

$$\rho_c = \frac{2G}{\pi d} \left(\frac{\ln 0,5}{\ln P_c} \right)^{1/6}, \quad (2)$$

куда вводили экспериментальные значения P_c^3 (в долях ед.) из табл. 1.

В качестве силовой нагрузки использовали груз массой 1,450 кг, ввиду чего его силовое воздействие составляет

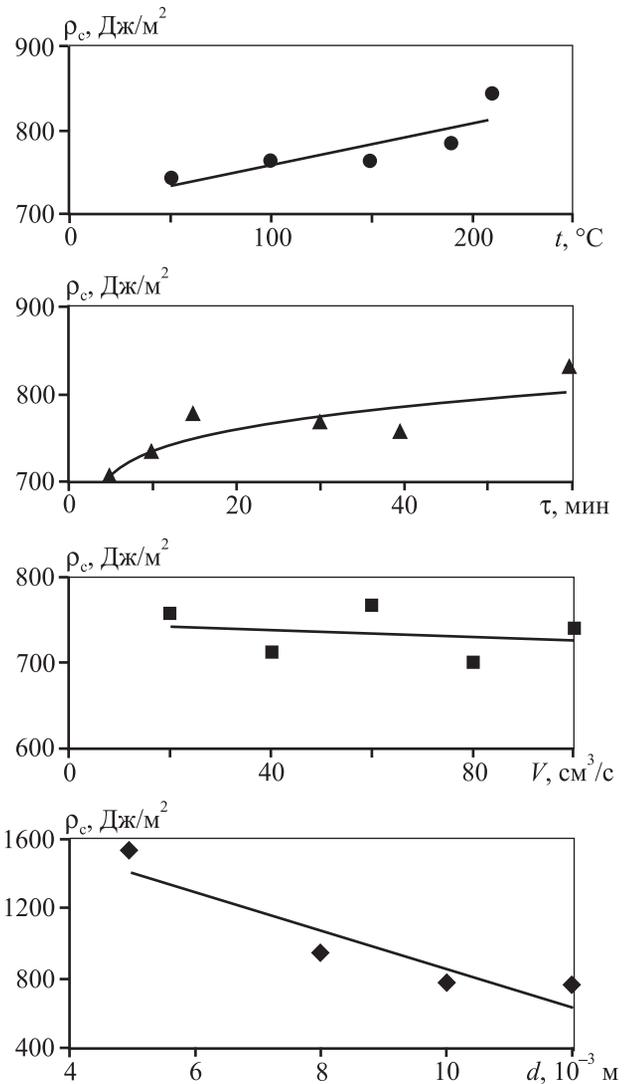
$$G = mg = 1,450 \cdot 9,82 = 14,239 \text{ Н.}$$

По результатам табл. 1 (ρ_c^3) построили зависимости влияния различных факторов на эффективное поверхностное натяжение гранул (см. рисунок). Подбор аппроксимирующих функций проведен с учетом физического смысла изучаемых зависимостей.

Адекватность полученных зависимостей также определяли по коэффициенту нелинейной множественной корреляции (R) [3] и его значимости (t_R) [4] (табл. 2).

Анализ частных зависимостей, представленных на рисунке, показывает, что с увеличением температуры сушильного агента поверхностное натяжение гранул возрастает, так как чем выше температура, тем лучше происходит обезвоживание лигносульфонатов при сушке, что приводит к упрочнению органического каркаса между частицами в грануле.

Как и следовало ожидать, величина ρ_c также возрастает с увеличением продолжительности сушки, что связано с уменьшением содержания остаточной



Зависимости эффективного поверхностного натяжения гранул от изучаемых факторов

Точки — экспериментальные данные, линии — расчет (см. табл. 2)
 ρ_c — эффективное поверхностное натяжение, t — температура сушильного агента, τ — продолжительность сушки, V — расход воздуха, d — размер гранул

Таблица 2
Коэффициент корреляции (R) и его значимость (t_R) для частных функций энергии поверхности разрушения, $Дж/м^2$

Функция	R	Условие $t_R > 2$	Значимость
$\rho_c = 0,5066t + 709,16$	0,6947	49,90 > 2	Значима
$\rho_c = 653,77\tau^{0,05}$	0,7143	3,47 > 2	Значима
$\rho_c = 746,34 - 0,2238V$	0,0629	0 < 2	Не значима
$\rho_c = 1964,2 - 111,04d$	0,8579	16,295 > 2	Значима

влаги, а следовательно, с укреплением прочностного каркаса из лигносульфонатов.

С повышением размера гранул их поверхностное натяжение уменьшается. Замечено, что более крупные окатыши после сушки, как правило, покрыты трещинами. Это подтверждает широко известный факт частичной декрептации конгломератов при сушке, приводящий в определенных условиях к их полному разрушению.

Зависимость поверхностного натяжения от расхода воздуха оказалась незначимой.

Полученные значимые уравнения для удельной энергии поверхности разрушения обобщаются, согласно [1], при центральном значении $\rho_{c,ц} = 796,35 \text{ Дж/м}^2$. Обобщенное уравнение выглядит следующим образом:

$$\rho_c = 1,583 \cdot 10^{-6} (0,5066t + 709,16) \times (653,77\tau^{0,05})(1964,2 - 111,04d). \quad (3)$$

При сопоставлении данных расчета и эксперимента определим значения $R = 0,909$, $t_R = 19,01 > 2$.

Подставляя уравнение (3) в модель (1), получаем расчетную вероятностную модель статической прочности гранул:

$$P_c = 0,5 \left[\frac{2G}{\pi d [1,583 \cdot 10^{-6} (0,5066t + 709,16) (653,77\tau^{0,05}) (1964,2 - 111,04d)]} \right]^6. \quad (4)$$

Уравнение для статической нагрузки может быть выражено через вес слоя, поскольку этот вид нагрузки в промышленных условиях является основным (в бункерах, штабелях, сушильных, обжиговых и плавильных печах). Эта нагрузка учитывается в приближении рядовой упаковки слоя через высоту и насыпную массу [2]:

$$G = d^2 h_c \gamma g, \quad (5)$$

где h_c — высота слоя, м; G — прилагаемая сила, Н = кг·м²/с; g — ускорение силы тяжести, равное 9,82 м/с²; γ — насыпная масса гранул, кг/м³.

При проведении исследований замеряли величину объемной плотности (насыпная масса гранул) влажных (сырых) гранул ($\gamma_{сыр}$) в каждом опыте.

Таблица 3

Статическая прочность (выход целых гранул, доли ед.), согласно (7), при вариациях высоты слоя, размера гранул и температуры сушки ($\tau = 30$ мин)

$d, 10^{-3} \text{ м}$	$t, ^\circ\text{C}$	$h, \text{ м}$								
		4	6	8	10	12	14	16	18	20
5	50	1	0,9999	0,9995	0,9981	0,9944	0,986	0,969	0,9382	0,8868
	150	1	0,9999	0,9997	0,9989	0,9966	0,9915	0,9812	0,9622	0,9301
	180	1	1	0,9998	0,9991	0,9972	0,9929	0,9842	0,9683	0,9411
	200	1	1	0,9998	0,9991	0,9974	0,9935	0,9855	0,9708	0,9458
8	80	0,9999	0,9985	0,9918	0,969	0,9103	0,7889	0,5896	0,3426	0,1333
	150	0,9999	0,9991	0,995	0,9812	0,9449	0,8668	0,7271	0,5241	0,2965
	180	0,9999	0,9993	0,9958	0,9842	0,9536	0,8872	0,7658	0,5823	0,3614
	200	0,9999	0,9993	0,9962	0,9855	0,9574	0,8959	0,7828	0,6086	0,3929
10	80	0,9995	0,9944	0,969	0,8868	0,6986	0,4047	0,1333	0,0168	0,0005
	150	0,9997	0,9966	0,9812	0,9301	0,8054	0,5795	0,2965	0,085	0,0097
	180	0,9998	0,9972	0,9842	0,9411	0,8343	0,6333	0,3614	0,127	0,0206
	200	0,9998	0,9974	0,9855	0,9458	0,8468	0,6575	0,3929	0,1505	0,0283
12	80	0,9985	0,9834	0,9103	0,6986	0,3427	0,0671	0,0024	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-10}$
	150	0,9991	0,99	0,9449	0,8054	0,5241	0,1961	0,0265	0,0006	$1 \cdot 10^{-6}$
	180	0,9993	0,9916	0,9536	0,8343	0,5823	0,2557	0,0479	0,0021	$9 \cdot 10^{-6}$
	200	0,9993	0,9923	0,9573	0,8468	0,6087	0,2859	0,0614	0,0035	$2 \cdot 10^{-5}$

Примечание. Выделены значения, соответствующие выходу целых гранул менее 0,8 (80 %) (т.е. разрушено более 0,2 (20 %)), что не приемлемо для технологии их дальнейшей переработки.

Объемная плотность исходных влажных гранул (кг/м^3) описывается соотношением [5] через их измеренную массу:

$$\gamma_{\text{сыр}} = m_1/v,$$

где v — объем, занимаемый гранулами, м^3 .

Насыпная масса влажных (сырых) гранул не зависит от режима их последующей тепловой обработки, т.е. объем гранулы не меняется в процессе ее обезвоживания, $v = \text{const}$. Выполнение этого условия свидетельствует об отсутствии грубых ошибок при проведении замеров и расчетов. Среднее значение насыпной массы сырых гранул составило $1018,0 \text{ кг/м}^3$.

Учитывая относительную убыль массы гранул ($W_1, \%$), перешедшую в газ в условиях опытов, получим насыпную массу подсушенных гранул:

$$\gamma_{\text{подс}} = \gamma_{\text{сыр}} \frac{(100 - W_1)}{100}. \quad (6)$$

После подстановки уравнений (5), (6) в (1) расчетная модель для сохранности гранул при статической нагрузке в бункерах выглядит так:

$$P_c^p = 0,5 \left(\frac{2dh_c \cdot 9,82 \gamma_{\text{подс}}}{\pi p_c (3)} \right)^6. \quad (7)$$

По уравнению (7) рассчитаны данные, характеризующие сохранность гранул при статической нагрузке в бункерах при вариации высоты слоя, размера гранул и температуры сушки (табл. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты исследования статической прочности окатышей чернового медно-молибденового концентрата.

Получены математические модели, описывающие закономерности эффективного поверхностного натяжения гранул. Контролируемыми показателями являлись объемная плотность и статическая прочность гранул.

Установлено, что для обеспечения сохранности гранул в среднем не менее 80 % допустимая высота слоя для среднего диаметра высушенных гранул 8 мм составляет не более 12 м, т.е. при заполнении в различные бункеры и накопительные емкости она не должна превышать указанные в табл. 3 величины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малышев В.П. // Вестн. АН Каз. ССР. 1978. № 4. С. 31.
2. Малышев В.П., Телешев К.Д., Нурмагамбетова А.М. Разрушаемость и сохранность конгломератов. Алматы: НИЦ «Гылым», 2003.
3. Дукарский О.М., Закурдаев А.Г. Статистический анализ и обработка данных на ЭВМ «Минск-22». М.: Статистика, 1971.
4. Сисыков В.И. Корреляционный анализ в экономических исследованиях. М.: Статистика, 1975.
5. Ломтадзе В.Д. Методы лабораторных исследований физико-химических свойств горных пород. Л.: Недра, 1972.

Издательство «Калвис» представляет:

Серия «XXI век сквозь призму экологии»

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ИМПЕРАТИВ ВЫЖИВАНИЯ. Кн. 1

В.Д. Кальнер, В.А. Полозов

М.: Калвис, 2012. — 324 с.

Настоящее издание — первая книга в задуманной серии «XXI век сквозь призму экологии» по проблемам взаимодействия общества и окружающей среды и практическим вопросам ее охраны.

Анализируются история возникновения термина «экология» и его трансформация в широкое социальное понятие; переход от единичных исследований естествоиспытателей прошлых веков к экологической парадигме цивилизации в XXI в. Рассмотрена возможность выживания человека как вида в условиях усиливающегося антропогенного давления на биосферу, роста числа локальных и глобальных рисков и катастроф. Обсуждаются некоторые подходы к возможному разрешению нарастающей вероятности конфликта цивилизации с окружающей средой.

Книга рассчитана на широкий круг читателей, обеспокоенных катастрофическим загрязнением и деградацией окружающей среды. Она будет полезна студентам и преподавателям различных уровней образования и специальностей, инженерам и технологам, представителям власти и бизнеса — всем, кто задумывается о качестве жизни своей, современников и ближайших потомков.