

В.П. КРАВЧЕНКО

(Украина, Мариуполь, ПАО "ММК им. Ильича"),

Ю.Г. СОБОЛЕВСКАЯ

(Украина, Львов, Львовский филиал Днепропетровского университета
железнодорожного транспорта),

В.З. КАЧАН

(Украина, Днепропетровский государственный университет)

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ТОНКОДИСПЕРСНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ДОМЕННЫХ ШЛАКОВ

Для проведения экспериментальных исследований гидравлической активности доменных граншлаков необходимо было установить оптимальные режимы работы струйной установки, обеспечивающие получение тонкодисперсных порошков доменных шлаков и других материалов.

Для этого были поставлены следующие задачи:

1. Получение тонкодисперсных порошков с удельной поверхностью $S = 0,6...0,9 \text{ м}^2/\text{г}$.

2. Определение рациональных технологических параметров струйного тонкодисперсного измельчения доменных шлаков.

3. Оценка дисперсности измельченных шлаков.

4. Определение производительности струйной установки и энергозатрат при тонкодисперсном измельчении.

Экспериментальные результаты, характеризующие режим измельчения и полученные при этом показатели дисперсности, и удельный расход энергоносителя (сжатого воздуха) в процессе струйного измельчения приведены в таблицах 1 и 2.

Струйному измельчению подвергали следующие материалы: отвальные доменные шлаки (проба 1), гранулированные шлаки без предварительного измельчения (проба 2, 3), цементный клинкер (проба 4), исходная крупность материалов 3,0 мкм.

Удельная поверхность $S^2(\text{м}^2/\text{г})$ измельченных материалов измерялась методом воздухопроницаемости на приборе Товарова Т-3. Все пробы (1–4) не подвергались предварительному измельчению.

В таблицах 1 и 2 представлены результаты измельчения на различных режимных параметрах работы струйного измельчителя.

Из результатов экспериментов, приведенных в табл. 1, следует, что на величину удельной поверхности S продукта циклона установки влияет режим работы классификатора. Эта зависимость приведена в табл. 2 и рис. 1.

Підготовчі процеси збагачення

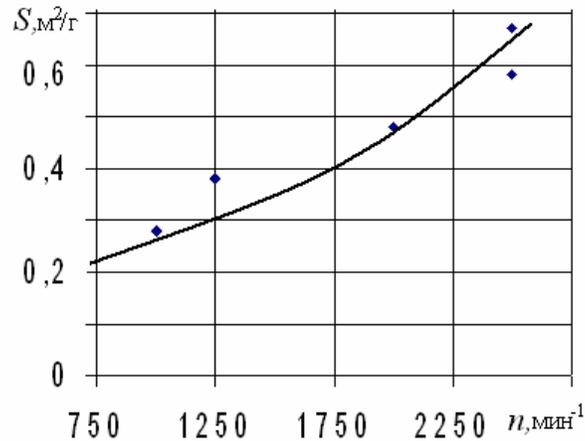


Рис. 1. Залежність удельної поверхності продуктів струйного измельчення шлака від частоти обертання ротора класифікатора, шлак вихідний, крупність 3-0 мм

Таблиця 1

Результати струйного измельчення отвального і гранульованого шлака, цементного клинкера

Номер		Режимні параметри і показателі					Дисперсність продукту
Вихідна проба	Измельченна проба	P , МПа	n , мин^{-1}	Q , $\text{м}^3/\text{ч}$	G , $\text{кг}/\text{ч}$	q , $\text{м}^3/\text{кг}$	S , $\text{м}^2/\text{г}$
Отвальный шлак (проба 1, крупність 3-0 мм)							
1	12	0,50	2000	90	5,85	15,4	0,3890
Гранульований шлак (проби 2, 3, крупність 3-0 мм)							
2	3	0,3	1000	84	2,2	38,2	0,246
2	4	0,3	600	78	5,0	15,6	0,209
2	6	0,3	2000	90	2,1	42,8	0,484
2	7	0,3	1250	78	2,1	37,1	0,270
2	13	0,55	2000	90	3,45	26,1	0,30
2	14	0,50	2500	80	1,80	44,4	0,675
2	15	0,40	1500	90	7,70	11,7	0,389
3	1	0,40	2000	90	2,80	32,1	0,388
3	2	0,45	2500	80	1,44	55,6	0,566
3	3	0,4	2500	80	1,3	61,5	0,540
3	4	0,4	1500	90	3,4	26,5	0,413
Цементний клинкер (проба 4, крупність 6-0 мм)							
4	1	0,40	2600	99	1,28	77,7	0,540
4	2	0,40	2900	99	2,20	45,2	0,436
4	3	0,40	2500	99	1,30	76,5	0,480
4	4	0,40	2000	99	2,40	41,4	0,455

Из рис. 1 видно, что с ростом частоты вращения ротора классификатора n возрастает удельная поверхность S измельчаемого продукта, т.е. $S = f(n)$. Методом математической статистики [1] определим зависимость между переменными S и n при помощи уравнений линейной и показательной (степенной) регрессий.

Результаты расчетов представлены в таблицах 3 и 4.

Изменение удельной поверхности S продуктов струйного измельчения шлака крупностью 3-0 мм в зависимости от режима работы отбойно-вихревого классификатора

№ пробы	Частота вращения ротора классификатора, n , мин^{-1}	Удельная поверхность продукта циклона, S , $\text{м}^2/\text{г}$
3	1000	0,246
4	600	0,209
6	2000	0,484
7	1250	0,270
14	2500	0,670
15	1500	0,389
1	2000	0,390
2	2500	0,570
4	1500	0,410

В результате расчетов по методу статистического анализа [1], получены следующие значения коэффициентов: коэффициент корреляции $r = 0,98$, коэффициент регрессии $\rho = 0,00021$, коэффициент $b = 0,066$.

Уравнение линейной регрессии:

$$\hat{S}_0 = \rho n + b = 0,00021n + 0,066.$$

Сопоставление опытных значений S и рассчитанных \hat{S}_0 по приведенной формуле, представлено в табл. 3.

Определим зависимость между переменными n и S при помощи степенной функции. Введем условные переменные $x = \ln n$ и $y = \ln S$. Дальнейшие расчеты регрессии приведены в табл. 3.

Таблиця 3

Параметры линейной и степенной зависимости удельной поверхности измельченного доменного шлака от частоты вращения ротора классификатора

Параметры		Линейная корреляция			Степенная корреляция				
n , мин^{-1}	S , $\text{м}^2/\text{г}$	\hat{S}_0	$\delta_0 = S - \hat{S}_0$	$\varepsilon_0 = \frac{\delta_0}{S} 100\%$	$x = \ln n$	$y = \ln S$	\hat{S}	$\delta_0 = S - \hat{S}$	$\varepsilon_0 = \frac{ \delta_0 }{S} 100\%$
600	0,209	0,181	0,0248	12,031	6,3969	-1,5654	0,1852	0,02384	11,4073
1000	0,246	0,264	-0,0176	7,136	6,9078	-1,4024	0,2724	-0,02643	10,7445
1250	0,270	0,315	-0,0450	16,673	7,1309	-1,3093	0,3225	-0,05249	19,4416
1500	0,389	0,366	0,0225	5,789	7,3132	-0,9442	0,3702	0,01885	4,8455
2000	0,484	0,469	0,0146	3,016	7,6009	-0,7257	0,4601	0,02392	4,9430
2500	0,570	0,572	-0,0023	0,408	7,8240	-0,5621	0,5446	0,02538	4,4530

В результате расчета при условных логарифмических переменных получены следующие значения коэффициентов: коэффициент корреляции $r = 0,96$, коэффициент регрессии $\rho = 0,76$, коэффициент $b = -6,52$.

Уравнение регрессии в условных переменных:

$$\hat{y} = \rho x + b = 0,76x - 6,52.$$

Підготовчі процеси збагачення

Переходим к исходным переменным:

$$\ln S = \rho \ln n + \ln e^b \Rightarrow \ln \hat{S} = \ln(e^b \cdot n^\rho) \Rightarrow \hat{S} = e^b \cdot n^\rho; (e^b = 0,00147).$$

Таким образом, степенная зависимость имеет вид: $\hat{S} = 0,00147 \cdot n^{0,76}$.

Сопоставление опытных значений S и расчетных \hat{S} по приведенной формуле представлены в табл. 3. Сравнение экспериментальных точек и расчетов по линейной и показательной (степенной) зависимости приведено на рис. 2.

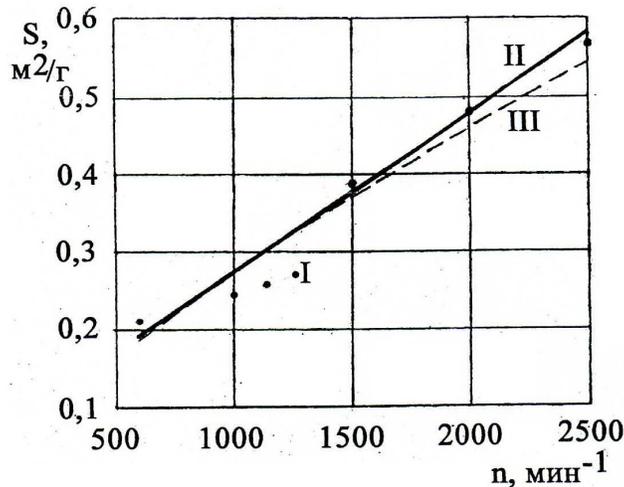


Рис. 2. Зависимость переменных S и n по уравнениям линейной и показательной регрессии:
I – экспериментальные точки; II – линейная регрессия;
III – показательная регрессия

Полученные расчетами коэффициенты корреляции, характеризующие степень линейной связанности, в данном эксперименте S и n , составляющие для линейной регрессии – $r = 0,98$, для показательной регрессии – $r = 0,96$ являются достаточно высокими. Это указывает на наличие тесной связи между удельной поверхностью S и частотой вращения ротора классификатора n .

Найденные уравнения регрессии II и III (рис. 2) позволяют вычислить наиболее вероятное значение одного из параметров, например, S , если известно значение другого параметра – n , т. е. при необходимости получения заданной степени измельчения, определенной удельной поверхностью S , можно определить требуемую для этого частоту вращения n ротора классификатора струйного измельчителя.

При этом средние отклонения значений S , определенные по полученным уравнениям регрессии, от экспериментальных значений составляют: для линейной регрессии – 7,5% , для степенной – 9,3% .

В практике эти величины отклонений не являются значительными. Следовательно, полученные уравнения регрессии приемлемы для практического использования.

Підготовчі процеси збагачення

Анализ результатов струйного измельчения доменных шлаков без их предварительного измельчения (табл. 1 и 2) показал, что поставленная задача: получить в циклоне струйным измельчением порошки дисперсностью, оцениваемой удельной поверхностью в пределах $S = 0,6...0,9 \text{ м}^2/\text{г}$ не была решена.

В следующем эксперименте были подвергнуты струйному измельчению ТГШ – продукт шарового измельчения доменных граншлаков.

В табл. 4 приведены результаты струйного измельчения доменного граншлака после предварительного измельчения в шаровой мельнице (ТГШ).

Таблица 4

Результаты струйного измельчения доменного граншлака,
предварительно измельченного в шаровой мельнице (ТГШ)

№ опыта	Режимные параметры и показатели					Выход и дисперсность продукции			
	P , МПа	n , мин ⁻¹	Q , м ³ /ч	G , кг/ч	q , м ³ /кг	циклон		фильтр	
						%	S , м ² /г	%	S , м ² /г
1	0,40-0,36	2500	90	4,8	18,7	95,9	0,92	4,1	2,15
2	0,41	2500	90	5,0	18,0	95,5	0,87	4,5	1,97
3	0,40-0,33	2500	90	4,5	20,0	92,4	0,72	7,6	1,95
4	0,40	2500	90	4,9	18,4	95,0	0,68	5,0	2,18
5	0,40	2500	90	4,7	19,1	93,6	0,77	6,4	2,02
6	0,40	2500	90	5,1	17,6	93,7	0,75	6,3	2,10
7	0,40	2500	90	4,9	18,4	93,8	0,70	6,2	2,11
8	0,40	2500	90	5,1	17,6	91,9	0,73	8,1	1,81

Из таблицы 4 видно, что результаты данного эксперимента по достигнутой дисперсности продукта циклона свидетельствуют о решении поставленной задачи получения нужной степени измельчения доменных шлаков ($S = 0,6...0,9 \text{ м}^2/\text{г}$), при использовании в качестве исходного материала для струйного тонкодисперсного измельчения доменных тонкогранулированных шлаков (ТГШ) при режимных параметрах струйного измельчения: $P = 0,4 \text{ МПа}$ и частоты вращения ротора классификатора $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$.

Как следует из таблиц (1, 2, 4) производительность струйной установки и удельный расход энергоносителя изменяется в зависимости от дисперсности измельченного шлака.

В табл. 5 приведены значения общего Q и удельного q расхода энергоносителя, а также расчетная G_p и рекомендуемая G_k производительность компрессора для струйных установок различных типоразмеров (производительности). При этом начальное давление энергоносителя составляет $P = 0,3...0,5 \text{ МПа}$, а его температура перед истечением $20...400 \text{ }^\circ\text{C}$; максимальная дисперсность продукта $d_{\text{max}} = 12...60 \text{ мкм}$.

Общий удельный расход энергоносителя (сжатого воздуха) в зависимости от производительности струйных установок различных типоразмеров

Q , кг/ч	q , м ³ /кг	G_p , м ³ /ч	G_k , м ³ /ч
2000	1,3 – 1,5	2600 – 3000	3500
1000	1,5 – 2,9	1500 – 2900	3500
500	1,7 – 3,5	850 – 750	2000
200	4,5	900	1200
100	7,7	770	1200
50	10,6	530	1000
10	12,5 – 20,2	125 – 202	300
2	32,0 – 43,0	64 – 86	120

На рис. 3 и 4 представлены обобщенные зависимости (в обычном и логарифмическом масштабе) удельного расхода энергоносителя (сжатого воздуха) от производительности струйных установок различных типоразмеров (производительностью от 2 до 2000 кг/ч) для различных материалов – доменный шлак, клинкер и др.

Соотношение между удельными расходами энергоносителя q и производительностью струйной установки G определялась по формуле:

– в обычном масштабе:

$$q = \frac{48,65 + 0,98 \cdot G}{1 + 0,928 \cdot G}; \quad (2)$$

– в логарифмическом масштабе:

$$q = \frac{10^{1,7}}{\sqrt{G}}; \quad r = 0,97 \text{ (для минимального уровня } q\text{)}. \quad (2)$$

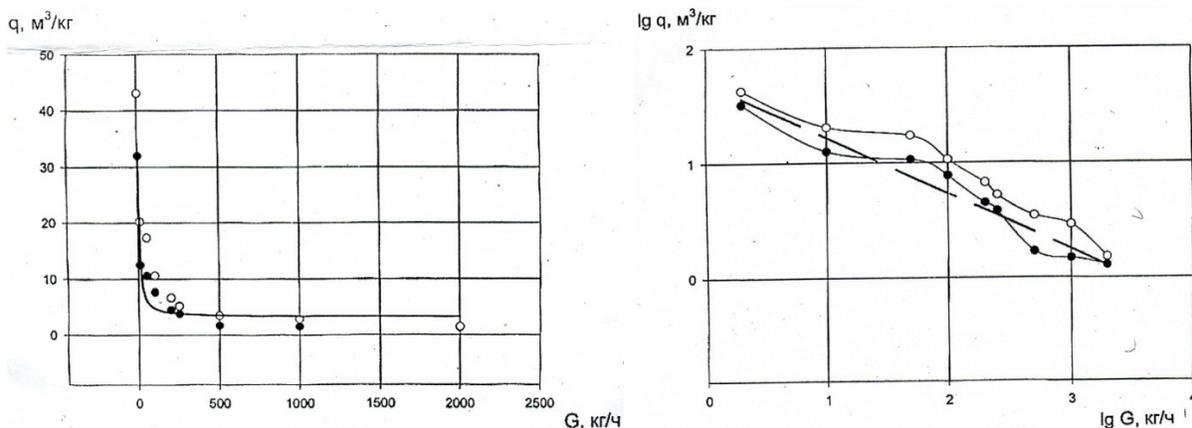


Рис. 3. Зависимость удельного расхода энергоносителя от производительности струйной установки:

○ – максимальная; ● – минимальная; --- – расчетная величина q

Підготовчі процеси збагачення

Взаимосвязь удельного расхода энергоносителя и производительности струйной установки (таблица 6) позволяет расчетным путем показать степень снижения энергозатрат при струйном измельчении при переходе от лабораторной мельницы к промышленной установке.

Таблица 6

Изменение энергозатрат при струйном измельчении при переходе от лабораторной мельницы к промышленной установке

q , м ³ /кг	G , м ³ /ч	q_1/q_2
1,3-1,5	2000	–
1,5-2,9	1000	$q_{1000}/q_{2000} = 1,5/1,3 = 1,15$
1,7-3,5	500	$q_{500}/q_{2000} = 1,7/1,3 = 1,31$
3,8-5,2	250	$q_{250}/q_{2000} = 3,8/1,3 = 2,92$
4,5-4,7	200	$q_{200}/q_{2000} = 4,5/1,3 = 3,46$
7,7-10,6	100	$q_{100}/q_{2000} = 7,7/1,3 = 5,92$
10,6-17,3	50	$q_{50}/q_{2000} = 10,6/1,3 = 8,15$
20,2	10	$q_{10}/q_{2000} = 20,2/1,3 = 15,54$
32-43	2	$q_2/q_{2000} = 32/1,3 = 24,60$

Из табл. 6 видно, что удельный расход энергоносителя снижается с ростом производительности измельчительной установки.

Выводы

1. Исследования позволили определить оптимальный режим тонкодисперсного измельчения доменных шлаков в струйном измельчителе.

2. Найденные уравнения линейной и показательной регрессии и коэффициенты корреляции экспериментально полученных значений удельной поверхности S измельченного шлака и частоты вращения n ротора классификатора струйного измельчителя доказывают взаимосвязь этих параметров.

3. Установлено, что производительность установки и удельный расход энергоносителя находится в зависимости от типоразмера установок и технологических параметров измельчения: режима классификации, дисперсности измельченного шлака.

Список литературы

1. Батунер Л.М. Позин М.Е. Математические методы в химической технике. – М.: Госхимиздат, 1953. – 469 с.

2. Горобец В.И. Горобец Л.Ж. Новое направление работ по измельчению. – М.: Недра, 1977. – 193 с.

© Кравченко В.П., Соболевская Ю.Г., Качан В.З., 2011

Надійшла до редколегії 05.12.2011 р.

Рекомендовано до публікації д.т.н. І.К. Младецьким