

**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

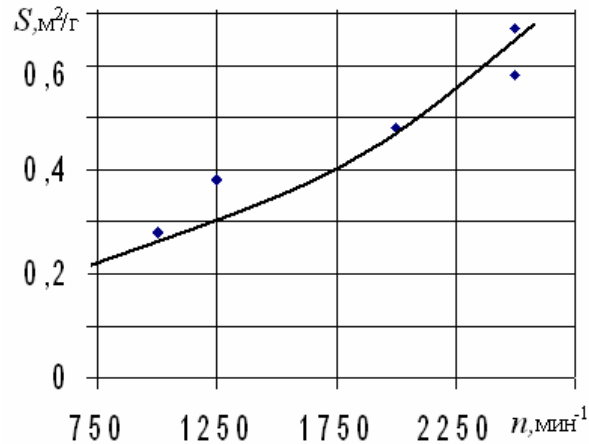


Рис. 1. Залежність удельної поверхності продуктів струйного измельчення шлака від частоти обертання ротора класифікатора, шлак вихідний, крупність 3-0 мм

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 <sup>-1</sup>	$Q$ , м <sup>3</sup> /ч	$G$ , кг/ч	$q$ , м <sup>3</sup> /кг	$S$ , м <sup>2</sup> /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, $n$ , $\text{мин}^{-1}$	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				
$n$ , $\text{мин}^{-1}$	$S$ , $\text{м}^2/\text{г}$	$\hat{S}_0$	$\delta_0 = S - \hat{S}_0$	$\varepsilon_0 = \frac{\delta_0}{S} 100\%$	$x = \ln n$	$y = \ln S$	$\hat{S}$	$\delta_0 = S - \hat{S}$	$\varepsilon_0 = \frac{ \delta_0 }{S} 100\%$
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.

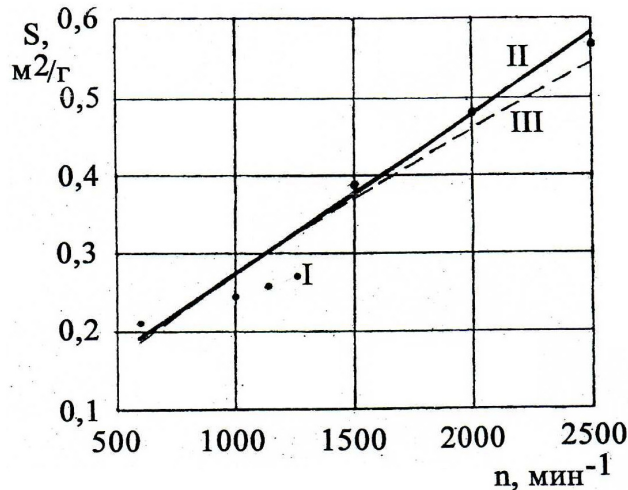


Рис. 2. Зависимость переменных  $S$  и  $n$  по уравнениям линейной и показательной регрессии:  
I – экспериментальные точки; II – линейная регрессия;  
III – показательная регрессия

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 потребную 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 <sup>-1</sup>	$Q$ , м <sup>3</sup> /ч	$G$ , кг/ч	$q$ , м <sup>3</sup> /кг	циклон		фильтр	
						%	$S$ , м <sup>2</sup> /г	%	$S$ , м <sup>2</sup> /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 <sup>3</sup> /кг	$G_p$ , м <sup>3</sup> /ч	$G_k$ , м <sup>3</sup> /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:

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

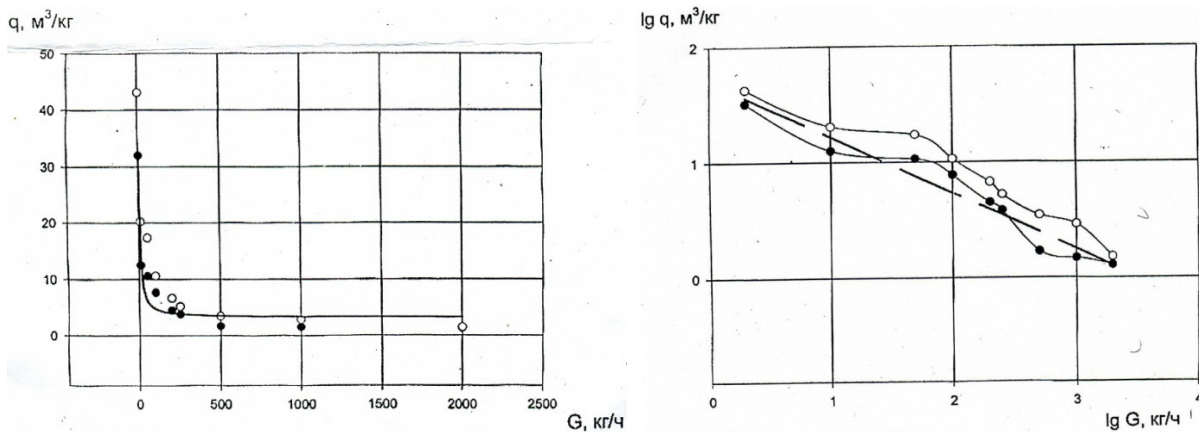


Рис. 3. Зависимость удельного расхода энергоносителя от производительности струйной установки:

○ – 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

$q, \text{ м}^3/\text{кг}$	$G, \text{ м}^3/\text{ч}$	$q_1/q_2$
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*