

УДК 622.788.36

Кривенко С.В.¹, Томаш А.А.², Безверхий И.В.³, Никош И.А.⁴

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ БАРАБАНА-ОКОМКОВАТЕЛЯ

С использованием плана полного факторного 2³ эксперимента исследовано влияние расхода аглошихты, длины и угла наклона окомкователя на порозность спекаемого слоя, эквивалентный диаметр и вариацию гранул. Полученные зависимости позволили оценить качество окомкования.

Важнейшим условием совершенствования газодинамического режима работы агломашин и увеличения высоты спекаемого слоя является повышение качества окомкования аглошихты (АШ). Существуют различные способы улучшения гранулометрического состава окомкованной АШ (добавление связующих, раздельный накат топлива, оптимизация фракционного состава комкуемой шихты и т.д.), однако практически все они мало применяются в производстве в связи со сложностью реализации. Поэтому наиболее рациональный способ – оптимизация параметров работы применяемого оборудования. Для барабана-окомкователя (БО) к таким параметрам относят угол наклона α , степень заполнения ξ , длина ℓ , частота вращения ω .

Существуют исследования, устанавливающие влияние каждого из параметров на качество окомкования АШ [1]. Однако при изменении конструктивных характеристик БО необходимо проведение дополнительных исследований. Кроме того, при оптимизации необходимо учитывать их взаимную зависимость.

Целью настоящей работы является исследование влияния расхода материала Q , угла наклона α и длины ℓ барабана-окомкователя, применяемого на ОАО «МК «Азовсталь», на качество окомкования агломерационной шихты.

Окомкование АШ осуществляли на лабораторной модели БО. При выборе параметров лабораторной установки соблюдались требования подобия [2]. В табл. 1 приведены параметры промышленного БО, установленного на ОАО «МК «Азовсталь», и его модели, выполненной в масштабе 1:8,3 ($M = 8,3$).

Таблица 1 – Расчёт параметров лабораторного БО

Параметр	Оригинал	Модель	Расчётное уравнение
Диаметр, м	$D_o = 2,5$	$D_m = 0,3$	$D_m = D_o / M$
Длина, м	$\ell_o = 6$	$\ell_m = 0,75$	$\ell_m = \ell_o / M$
Скорость вращения, об/мин	$\omega_o = 5$	$\omega_m = 14,5$	$\omega_m = \omega_o \cdot \sqrt{M}$
Угол наклона, град	$\alpha_o = 0$	$\alpha_m = 0$	$\alpha_m = \alpha_o$
Расход материала, кг/мин	$Q_o = 3700$	$Q_m = 13$	$Q_m = Q_o / (1,44 \cdot M^{2,5})$

Состав исходной АШ соответствовал условиям работы аглофабрики ОАО «МК «Азовсталь» в 2004 г. и состоял из рудной смеси со штабеля усреднительного склада 77,7 %, известняка 2,73 %, топлива 2,45 %, возврата 17,1 %.

Для определения оптимальной влажности окомкованной АШ определяли гранулометрический состав с помощью набора круглых сит, по которому рассчитывали порозность слоя ε , среднелогарифмический диаметр d_s и вариацию V гранул (табл. 2).

Порозность слоя ε рассчитывали по методике, описанной в [3].

Исходя из исследований [4], наиболее объективным способом усреднения диаметра частиц является усреднение среднелогарифмических диаметров каждой фракции. Усредненный таким способом диаметр учитывает относительное количество каждой фракции, удельную поверхность и ее диапазон. Среднелогарифмический диаметр определялся по формуле

¹ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

²ПГТУ, д-р. техн. наук, проф.

³ПГТУ, ст. преп.

⁴«Азовинжениринг», инж.

$$\lg d_3 = \frac{\sum g_i \lg d_i}{\sum g_i}, \quad (1)$$

где g_i и d_i – масса и средний диаметр i -той фракции, $г$ и $мм$, соответственно.

Таблица 2 – Результаты окомкования АШ различной влажности

Влаж- ность АШ, %	Фракционный состав, %							Пороз- ность, %	Экв. диаметр, мм	Вариа- ция, мм/мм
	0-1 мм	1-2 мм	2-3 мм	3-5 мм	5-7 мм	7-10 мм	+10 мм			
5,8	35,79	7,05	6,35	10,68	9,80	15,03	15,30	26,01	2,36	1,52
6,2	37,10	9,12	8,88	13,88	9,11	10,34	11,57	18,77	2,06	1,64
6,7	34,02	9,27	8,41	14,28	10,77	12,36	10,89	26,61	2,23	1,49
8,1	35,52	11,38	8,48	11,19	8,12	12,20	13,12	20,44	2,14	1,59
8,5	10,00	19,20	15,61	18,21	11,11	11,91	13,97	33,13	3,32	0,76
9,1	7,48	19,38	13,19	16,79	11,36	15,21	16,59	28,48	3,72	0,67

Вариацию гранул вычисляли по формуле

$$V = \frac{10 \sqrt{D_{lg}}}{d_3}, \text{ мм/мм}, \quad (2)$$

где D_{lg} – логарифмическая дисперсия

$$D_{lg} = (\lg \sigma_{d_3})^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\lg d_i - \lg d_3)^2 \cdot g_i}{\sum_{i=1}^N g_i}, \quad (3)$$

где σ_{d_3} – среднеквадратическое отклонение диаметров гранул, $мм$.

При содержании влаги W до 8,1 % окомкование практически не происходило. Содержание фракции -1 мм составило более 35 %. Наивысшая порозность ($\varepsilon = 33,13$ %) и наилучший фракционный состав (содержание фракции 1 ÷ 3 мм – 34,8 %) достигается при влажности $W = 8,5$ %. Удовлетворительные результаты получены также при $W = 9,1$ % ($\varepsilon = 28,48$ %, 1 ÷ 3 мм – 32,6 %). Таким образом, оптимальной для окомкования является влажность АШ $W_{\text{опт}} = 8,5 \div 9,0$ %. Содержание влаги более 9 % в АШ приводит к переувлажнению и ухудшению качества окомкования. Полученное значение $W_{\text{опт}}$ несколько выше общепринятой 7 ÷ 8 %. Это может быть обусловлено большим расходом извести, поглощающей влагу и подсушивающей шихту. При содержании влаги 10,9 % из-за переувлажнения шихта скатывалась в единый грязевой ком с $\varepsilon = 0$. Поэтому с повышением W до 9,1 % величина d_3 изменяется с 2,06 мм до 3,72 мм, а вариация V снижается с 1,64 мм/мм до 0,67 мм/мм.

В лабораторных условиях проведено исследование влияния на качество окомкования факторов, изменение которых в промышленных условиях не представляется возможным. Исследовано влияние на порозность окомкованной АШ следующих факторов: расхода шихты через БО (Q , $t/\text{мин}$, X_1), угла наклона БО (α , $град$, X_2), длины БО (l , $м$, X_3). Исследования проводились по плану двухуровневого полного факторного эксперимента [2]. Варьируемые значения каждого фактора, значения, соответствующие 0-му уровню, и интервалы варьирования для реальных условий и модели приведены в табл. 3.

Кодированное значение каждого фактора определяется по уравнению

$$X_i = (x_i - x_{0i})/I_i, \quad (4)$$

где X_i и x_i – кодированное и фактическое значения i -го фактора; x_{0i} – фактическое значение i -го фактора на нулевом уровне; I_i – интервал варьирования i -го фактора.

Таблица 3 – Значения факторов при планировании эксперимента

Уровень	Расход шихты Q (X_1)		Угол наклона α (X_2)		Длина барабана l (X_3)	
	натура, <i>т/мин</i>	модель, <i>кг/мин</i>	натура, <i>град</i>	модель, <i>град</i>	натура, <i>м</i>	модель, <i>м</i>
Максимальный +1	2,8	14	2	2	10	1,25
Минимальный -1	2,4	12	-2	-2	6	0,75
0	2,6	13	0	0	8	1,0
Интервал	0,2	1	2	2	2	0,25

Состав шихты и порядок проведения каждого опыта сохранялись такими же, как и при исследовании влияния влажности шихты на качество окомкования. Влажность шихты во всех опытах поддерживалась на оптимальном уровне 8,5 ÷ 9,0 %. План проведения экспериментов представлен в табл. 4. В матрице планирования «+» соответствует максимальному значению каждого фактора +1, «-» – минимальному -1 (см. табл. 3).

Таблица 4 – План проведения и результаты экспериментов

№	X_1	X_2	X_3	$\varepsilon, \text{м}^3/\text{м}^3$
1	+	+	+	0,2650
2	+	-	-	0,2892
3	-	+	-	0,3358
4	-	-	+	0,2815
5	+	+	-	0,3105
6	-	-	-	0,2908
7	-	+	+	0,3247
8	+	-	+	0,3851
				$\bar{\varepsilon} = 2,4826$

Порозность окомкованной шихты рассчитывали по фракционному составу, приведенному в табл. 5. Влияние исследуемых факторов на порозность окомкованной шихты описывали полиномом первого порядка

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3. \quad (5)$$

Коэффициенты полинома (5) определяли по уравнениям

$$b_0 = \frac{\sum Y_i}{N}, \quad b_i = \frac{\sum (X_i \cdot Y_i)}{N}, \quad (6)$$

где N – количество опытов по плану.

$$b_0 = \bar{\varepsilon} = 0,3103$$

$$b_1 = (0,265 + 0,289 - 0,336 - 0,282 + 0,311 - 0,291 - 0,325 + 0,385)/8 = 0,0021$$

Таблица 5 – Результаты экспериментов по плану

№	Фракционный состав, %							Экв. диаметр, мм	Вариация, мм/мм
	0 – 1 мм	1 – 2 мм	2 – 3 мм	3 – 5 мм	5 – 7 мм	7–10 мм	10-14 мм		
1	12,19	19,05	13,61	13,75	10,42	15,29	15,67	3,34	0,81
2	13,19	23,59	15,85	14,79	9,92	13,40	9,26	2,84	0,91
3	9,79	21,87	16,40	14,48	9,28	13,46	14,71	3,27	0,78
4	12,05	21,54	13,67	13,56	10,15	20,18	8,85	3,15	0,83
5	14,14	5,52	14,04	20,99	13,42	15,28	16,61	3,73	0,72
6	20,29	14,15	9,09	11,50	9,73	14,94	20,29	3,16	0,99
7	13,49	5,67	14,94	22,42	14,02	17,44	12,03	3,65	0,71
8	11,83	3,84	5,76	21,47	18,25	23,68	15,18	4,43	0,58

Аналогично $b_2 = -0,0013$, $b_3 = 0,0037$. Полином (5) принимает вид

$$Y = 0,3103 + 0,0021 \cdot X_1 - 0,0013 \cdot X_2 + 0,0037 \cdot X_3. \quad (7)$$

Уравнение зависимости порозности от фактических значений исследуемых факторов получаем преобразованием (7) с учётом связи кодированных и фактических значений (4) каждого фактора.

$$\varepsilon = 0,3103 + 0,0021 \frac{Q - 2,6}{0,2} - 0,0013 \frac{\alpha - 0}{2} + 0,0037 \frac{l - 8}{2}, \text{м}^3/\text{м}^3, \quad (8)$$

$$\varepsilon = 0,2678 + 0,0106 \cdot Q - 0,0007 \cdot \alpha + 0,0019 \cdot l, \text{м}^3/\text{м}^3. \quad (9)$$

Аналогично получаем

$$D_9 = 0,854 + 0,696 \cdot Q + 0,026 \cdot \alpha + 0,098 \cdot l, \text{мм}, \quad (10)$$

$$V = 1,520 - 0,188 \cdot Q - 0,018 \cdot \alpha - 0,030 \cdot l, \text{мм/мм}. \quad (11)$$

Для улучшения газопроницаемости слоя окомкованной АШ необходимо увеличивать ε , d_s и уменьшать V . В соответствии с (9) повышению ε способствует увеличение Q , уменьшение α , увеличение ℓ . Однако влияние каждого из факторов незначительно. Так увеличение ℓ на 2 м позволит увеличить ε на $\approx 0,004 \text{ м}^3/\text{м}^3$, что мало скажется на газопроницаемости слоя АШ. Согласно (10) увеличение всех исследуемых факторов повышает значение d_s . При этом увеличение α и ℓ влияет незначительно как на d_s , так и на V . Поэтому заметное улучшение качества окомкования АШ может обеспечить увеличение ℓ до 12 м. При этом ε увеличится на $\approx 0,011 \text{ м}^3/\text{м}^3$, d_s – на $\approx 0,6$ мм, а V уменьшится на 0,18 мм/мм. Однако в условиях работающей аглофабрики осуществить такую реконструкцию практически невозможно. В соответствии с результатами исследований установка наклона БО в сторону загрузочного конца под углом $\alpha = -2^\circ$ позволит повысить ε на $0,0036 \text{ м}^3/\text{м}^3$. В то же время установка БО под отрицательным α наряду с незначительным увеличением ε сопровождалась накоплением переувлажнённой АШ в загрузочной части БО с последующим обрушением накопившейся массы. Подобные явления в промышленном БО могут приводить к периодичности в работе агломашины с периодом обрушения переувлажнённой АШ в несколько минут. Спрессованные плоские переувлажнённые фрагменты АШ, образующиеся в гарнисаже входного конца БО и попадающие в шихту при обрушении, не пропекаются и остаются в виде плоских неспеченных включений шихты в кусках агломерата. Это приводит к увеличению содержания мелких пылеватых фракций в агломерате при расसेве. Положительное влияние Q на качество окомкования позволяет сделать вывод, что увеличение производительности аглофабрики, сопровождающееся увеличением количества подготавливаемых материалов, проходящих через БО, не ухудшает качества окомкования.

Полученные результаты возможно использовать при реконструкции аглоцеха ОАО «МК «Азовсталь». В перспективе также можно исследовать влияния других параметров БО (например, диаметра, скорости вращения) и свойств комкуемой АШ (например, температура, дозировка). Установленные зависимости позволят оптимизировать работу БО при изменяющихся производительности агломашин и дозировке компонентов АШ.

Выводы

1. В условиях ОАО «МК «Азовсталь» целесообразно увеличить длину окомкователя. Увеличение производительности агломерационной машины, следовательно, и барабана-окомкователя, способствует повышению качества окомкования. Угол наклона окомкователя на газопроницаемость слоя влияет незначительно.
2. Максимум порозности слоя окомкованной аглошихты и минимум вариации гранул при изменении параметров окомкователя не совпадают. При достижении максимальной порозности $0,385 \text{ м}^3/\text{м}^3$ значение вариации равно 0,578 мм/мм. При минимальной вариации 0,72 мм/мм значение порозности слоя составило $0,385 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Перечень ссылок

1. *Коротич В.И.* Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке / *В.И. Коротич*. – М.: Металлургия, 1978. – 207 с.
2. *Ковшов В.Н.* Постановка инженерного эксперимента / *В.Н. Ковшов*. – К. – Донецк: Вища школа, 1982. – 120 с.
3. *Кривенко С.В.* Дискретная модель слоя сыпучего материала из зерен любых форм / *С.В. Кривенко, О.В. Кривенко* // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. пр. – Маріуполь, 2004. – Вип. 14. – С. 37 – 40.
4. *Теплотехника окускования железорудного сырья / С.Г. Братчиков, Ю.А. Берман, Я.Л. Белоцерковский и др.* – М.: Металлургия, 1970. – 343 с.

Рецензент: В.П. Тарасов
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 30.01.2009