

УДК 531.31.15+669

Мороз В. В.,  
к.т.н. Левченко Э. П.,  
к.э.н. Зинченко А. М.,  
к.т.н. Левченко О. А.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СНИЖЕНИЯ КРУПНОСТИ ГОТОВОГО АГЛОМЕРАТА В ОДНОВАЛКОВОЙ ЗУБЧАТОЙ ДРОБИЛКЕ

Проанализированы основные конструктивные и технологические параметры одновалковой зубчатой дробилки горячего агломерата с целью снижения крупности кусков в готовом продукте. Получена полиномиальная математическая модель, адекватно описывающая процесс дробления.

**Ключевые слова:** одновалковая зубчатая дробилка, анализ, конструктивные и технологические параметры, моделирование, функция отклика.

### Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

В процессе получения товарного агломерата как сырья для производства чугуна предварительно спеченный из компонентов железорудной шихты агломерационный пирог подвергается дроблению на фракции, размеры которых должны удовлетворять условиям доменной плавки с точки зрения оптимальных условий ее протекания [1, 2]. На агломерационных предприятиях такой процесс осуществляется с помощью одновалковых зубчатых или щековых дробилок [3]. С учетом конструктивных и технологических особенностей процесса дробления в готовом агломерате практически всегда присутствуют куски больших размеров, а именно, от 70 до 200 мм, которые при многочисленных перегрузках саморазрушаются с образованием пылевых фракций крупностью 5 мм и менее, что крайне нежелательно по условиям газопроницаемости для доменных печей.

Учитывая то, что применяемые дробилки разрушают аглопирог в одну стадию, добиться желаемых для выплавки чугуна размеров кусков агломерата, а именно 5–50 мм, при этом фактически невозможно. Согласно теории и практике дробления [4], максимально реализуемая степень дробления составляет в среднем около 50. Так как агломерационный пирог имеет размеры

1x2x0,32 м, а требуемый размер готового продукта 50–70 мм, то необходимо организовать процесс дробления в 2–3 стадии с постепенным уменьшением крупности готового продукта. Однако существующие конструкции дробилок агломерата не позволяют это осуществить без предварительной их модернизации. Таким образом, остро встает вопрос о снижении максимальной крупности получаемых кусков хотя бы до максимально возможного размера, обусловленного существующими техническими ограничениями.

**Постановка задачи.** Задачей данной работы является анализ возможностей получения готового агломерата с максимальной крупностью кусков до 70 мм на основе изучения влияния основных параметров технологического процесса дробления.

**Изложение материала и его результаты.** Так как агломерационный пирог мгновенно попадает в дробилку, а угловая частота вращения ротора не согласована со скоростью подачи материала, что приводит к образованию кусков с размерами более 200 мм, используем формулу [2]:

$$\omega = \frac{1}{S} \left( \frac{2\pi}{N} - 2 \operatorname{arctg} \frac{B}{2R} - 2 \operatorname{arctg} \frac{h}{2R_3} \right) \times \left( 2V_m \sin \alpha + \sqrt{V_m \sin \alpha + (\sin \alpha - f \cos \alpha) 2gL} \right), \text{ с}^{-1}, (1)$$

где  $S$  — значение подачи на зуб звездочки, характеризующее наибольший размер дробленого агломерата;  $N$  — число зубьев звездочки ротора;  $B$  — толщина зуба;  $R$  — радиус звездочки ротора;  $h$  — высота пирога;  $V_m$  — скорость движения пирога на спекательных тележках (паллетах);  $\alpha$  — угол наклона направляющей поверхности;  $R_3$  — радиус в месте захвата агломерата зубом звездочки ротора;  $f$  — коэффициент трения скольжения агломерата ( $f=0,45...0,55$ );  $L$  — длина пирога агломерата (1 м).

Определимся со значениями десяти параметров, входящих в формулу (1), проанализировав их влияние на максимальную крупность готового агломерата.

Значение подачи  $S$  должно быть ограничено наибольшим размером куска агломерата, полученного после дробления, что с точки зрения наилучших условий доменной плавки составляет 0,07 м/зуб (70 мм/зуб).

Число зубьев звездочки ротора  $N$  в настоящее время, по данным научного анализа литературы, применяется в диапазоне от 2 до 6, но с точки зрения снижения подачи на зуб число звездочек целесообразно увеличить до возможного максимального значения, одновременно увеличив их толщину  $B$ , что будет способствовать уменьшению значения подачи агломерата внутри рабочей зоны дробилки.

Радиус звездочки ротора  $R$  целесообразно уменьшить, что приведет к снижению линейной скорости воздействия зуба на агломерат, при этом угловую скорость вращения ротора желательно повысить.

Высота пирога  $h$  (высота спекания) для ОАО "Алчевский металлургический комбинат" составляет 0,32 м, но для других реально существующих условий производства может достигать 0,5 м (спекание в высоком слое).

Скорость движения агломерата  $V_{11}$  на спекательных тележках на ОАО "АМК" составляет около 0,03–0,033 м/с (1,8–2,0 м/мин) и ее существенно изменять нецелесообразно.

Угол наклона направляющей поверхности  $\alpha$  в настоящее время в действующем

производстве достигает около  $60^\circ$ , что приводит к высокой скорости подачи агломерата внутрь дробилки. Поэтому его желательно уменьшить, руководствуясь условиями равновесия пирога на наклонной плоскости с учетом коэффициента трения, т. е. определить минимальный угол, когда движение пирога будет отсутствовать или происходить со скоростью движения паллет на агломашине.

Радиус в месте захвата агломерата зубом звездочки ротора  $R_3$ , по условиям крупности задаваемый подачей на зуб, должен соответствовать этой подаче, то есть зависеть от  $R_3=R-S$ .

Коэффициент трения  $f$  агломерата по стали может достигать значений  $f=0,35...0,55$ . Так как наихудшими условиями является максимальная крупность дробленого агломерата, то это будет достигаться при наименьшем значении коэффициента трения (0,35), которое следует задавать при расчетах. Если же коэффициент трения будет выше указанного значения, то и максимальная крупность агломерата будет меньше по причине меньшей скорости его скольжения по наклонной направляющей.

Длина пирога агломерата  $L$  зависит от длины паллет и в настоящее время в основном составляет 1 м.

Из анализа составляющих, входящих в формулу (1), следует, что имеются параметры, изменение значений которых по сравнению с существующими в реальном производстве, осуществлять нецелесообразно. К ним относятся:

1. Значение подачи  $S=0,07$  м/зуб.
2. Высота пирога  $h=0,32$  м.
3. Коэффициент трения агломерата по стали  $f=0,35$ .
4. Скорость движения агломерата на спекательных тележках  $V_m=0,033$  м/с.
5. Радиус в месте захвата агломерата зубом звездочки ротора  $R_3=R-S$ .
6. Длина пирога агломерата  $L=1$  м.
7. Число зубьев звездочки ротора  $N=4$  шт.

Таким образом, в качестве основных факторов, влияющих на угловую скорость вращения ротора одновалковой зубчатой дробилки  $\omega$  и определяющих максимальную крупность, будут выступать:

1. Толщина зуба  $B$ .
2. Радиус звездочки ротора  $R_3$ .
3. Угол наклона направляющей поверхности  $\alpha$ .

При этом надо стремиться к уменьшению угловой скорости вращения ротора дробилки, так как, обладая большими размерами и массой, вращающийся ротор при значительных скоростях может привести к более тяжелым условиям работы дробилки и даже вызвать резонанс системы, что крайне нежелательно.

Для проведения многофакторных исследований применяем центральное композиционное ротатабельное униформпланирование второго порядка [6] как наиболее точный тип планирования экспериментов. Интервалы варьирования факторов представлены в таблице 1. При проведении опытов, необходимых для определения численных значений коэффициентов регрессии, факторы задавались не в натуральном, а в кодовом обозначении, при котором размах их колебаний строго определен в соответствии с типом планирования [5]. Выбор факторов и уровней их варьирования осуществлялся с учетом научного анализа литературы, посвященной дроблению агломерата в одновалковой

зубчатой дробилке, а также обеспечения её работоспособности. Для проведения эксперимента была составлена компьютерная программа расчета на языке программирования Basic, при этом анализ исследуемой математической модели показал, что при значении угла наклона направляющей плоскости  $\alpha < 20^\circ$  подкоренное выражение принимает отрицательное значение. Учитывая, что в этом случае пирог агломерата будет двигаться со скоростью, равной скорости движения спекательных тележек, в формуле (1) при углах наклона  $\alpha < 20^\circ$  принимаем скорость движения пирога по направляющей равной 0,033 м/с, что соответствует реальным производственным условиям спекания агломерата.

В качестве функции отклика выбираем угловую скорость вращения ротора  $\omega$ .

Матрица центрального композиционного ротатабельного униформпланирования второго порядка представлена в таблице 2.

Для реализации экспериментов обеспечивались сочетания уровней варьирования в соответствии с матрицей планирования (табл. 2). Для этого в формулу (1) поочередно вводились соответствующие значения: задавалась необходимая толщина зуба, радиус звездочки ротора и угол наклона направляющей. Затем рассчитывались значения угловой скорости вращения ротора по формуле (1), где постоянные параметры задавались значениями, обоснованными ранее.

Таблица 1

Интервалы варьирования факторов

Параметры	Факторы		
	Толщина зуба, $x_1(B)$ , м	Радиус звездочки, $x_2(R)$ , м	Угол наклона направляющей, $x_3(\alpha)$ , °
Основной уровень, $x_i=0$	0,375	0,575	45,00
Интервал варьирования, I	0,045	0,045	8,91
Верхний уровень, $x_i=+1$	0,420	0,620	53,91
Нижний уровень, $x_i=-1$	0,330	0,530	36,09
Верхняя звездная точка, $x_i=+1,682$	0,450	0,650	60,00
Нижняя звездная точка, $x_i=-1,682$	0,300	0,500	30,00

Таблица 2

Центральное композиционное ротатбельное униформпланирование

№ п/п	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub> (B)	X <sub>2</sub> (R)	X <sub>3</sub> (α)	X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
2	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1
3	+1	1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1
4	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1
5	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1
6	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1
7	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
9	+1	-1,682	0	0	2,829	0	0	0	0	0
10	+1	+1,682	0	0	2,829	0	0	0	0	0
11	+1	0	-1,682	0	0	2,829	0	0	0	0
12	+1	0	+1,682	0	0	2,829	0	0	0	0
13	+1	0	0	-1,682	0	0	2,829	0	0	0
14	+1	0	0	+1,682	0	0	2,829	0	0	0
15	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

В результате изучения влияния исследуемых факторов на угловую скорость вращения ротора получена следующая адекватная модель процесса работы одно-валковой зубчатой дробилки:

$$y = 51,95 - 1,10x_1 - 1,30x_2 + 8,65x_3 - 1,08x_3^2 - 0,08x_1x_2 - 0,18x_1x_3 - 0,22x_2x_3. \quad (2)$$

Уравнение (2) имеет квадратичный характер, при этом все его составляющие являются значимыми.

Для изучения влияния факторов  $x_1(B)$ ,  $x_2(L)$ ,  $x_3(\alpha)$  в отдельности на функцию отклика  $y$  (угловую скорость вращения ротора) по зависимости (2), полагаем значения двух других факторов: -1,682; 0; 1,682. Тогда (2) примет вид:

при  $x_2=x_3=-1,682$

$$y_1 = 35,91 - 0,94x_1; \quad (3)$$

при  $x_2=x_3=0$

$$y_2 = 51,95 - 1,10x_1; \quad (4)$$

при  $x_2=x_3=1,682$

$$y_3 = 60,63 - 1,54x_1; \quad (5)$$

при  $x_1=x_3=-1,682$

$$y_4 = 40,94 - 0,79x_2; \quad (6)$$

при  $x_1=x_3=0$

$$y_5 = 51,95 - 1,30x_2; \quad (7)$$

при  $x_1=x_3=1,682$

$$y_6 = 56,24 - 1,81x_2; \quad (8)$$

при  $x_1=x_3=-1,682$

$$y_7 = 55,76 + 0,67x_3 - 1,08x_3^2; \quad (9)$$

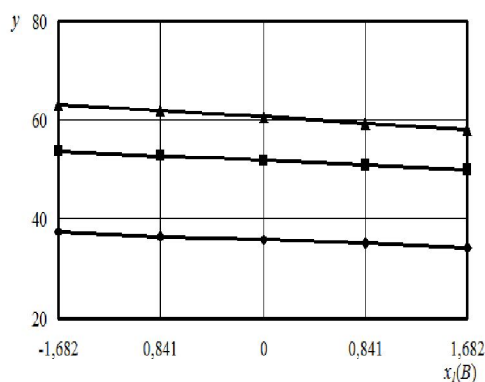
при  $x_1=x_3=0$

$$y_8 = 51,95 + 8,65x_3 - 1,08x_3^2; \quad (10)$$

при  $x_1=x_3=1,682$

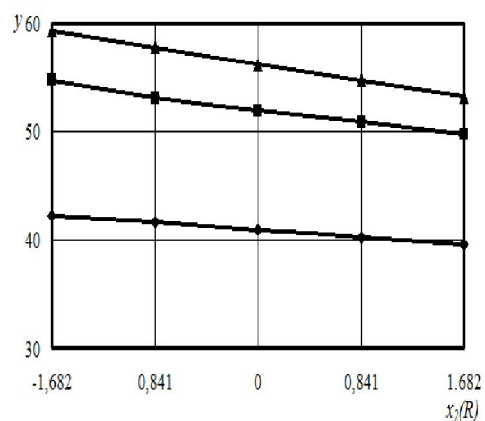
$$y_9 = 47,68 - 0,67x_3 - 1,08x_3^2. \quad (11)$$

По уравнениям (3–11) определяли значения функций откликов  $y_1$ – $y_9$  при моделировании работы дробилки. Для этого значения аргументов полагали равными:  $-1,682$ ;  $-0,841$ ;  $0$ ;  $0,841$ ;  $1,682$ . Графики соответствующих зависимостей представлены на рисунках 1–3.



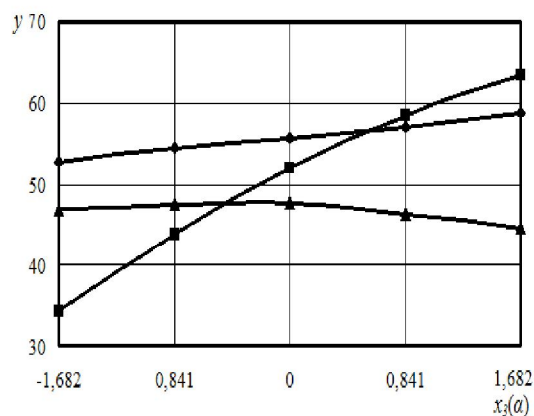
$x_1(B)$ :  $\blacklozenge$  –  $y_1$ ;  $\blacksquare$  –  $y_2$ ;  $\blacktriangle$  –  $y_3$

Рисунок 1 Графики зависимостей  $y_1$ – $y_3$  от толщины зуба



$x_2(R)$ :  $\blacklozenge$  –  $y_4$ ;  $\blacksquare$  –  $y_5$ ;  $\blacktriangle$  –  $y_6$

Рисунок 2 Графики зависимостей  $y_4$ – $y_6$  от радиуса звездочки ротора



$x_3(\alpha)$ :  $\blacklozenge$  –  $y_4$ ;  $\blacksquare$  –  $y_5$ ;  $\blacktriangle$  –  $y_6$

Рисунок 3 Графики зависимостей  $y_4$ – $y_6$  от угла наклона направляющей

Графики на рисунке 1 показывают, что от толщины зуба звездочки ротора крупность готового продукта изменяется в очень незначительной мере и ее в практическом плане можно не учитывать.

Из рисунка 2 видно, что графики функции отклика  $y_4$ – $y_6$  от фактора  $x_2(L)$  (кривые  $y_{14}$ – $y_{15}$ ) носят криволинейный характер, что говорит о влиянии радиуса звездочки ротора на угловую скорость вращения при максимальной крупности агломерата 70 мм. Минимум функции наблюдается при значениях фактора  $x_2(L)$ , близких к нулю.

Графики на рисунке 3 показывают, что функция отклика  $y$  от фактора  $x_3(\alpha)$ , характеризующего наклон направляющей плоскости  $x_3(\alpha)$ , имеет криволинейную зависимость с возрастанием  $y$  при увеличении  $x_3(\alpha)$ . Таким образом, для поддержания максимальной крупности агломерата не более 70 мм угол наклона направляющей следует уменьшать. При этом наименьшее значение угловой скорости вращения ротора и нулевой уровень значения фактора не совпадают.

При переходе к натуральным значениям факторов необходимо использовать зависимости [7]

$$x_1 = \frac{h-0,375}{0,045}, \quad (12)$$

$$x_2 = \frac{R-0,575}{0,045}, \quad (13)$$

$$x_3 = \frac{\alpha-45}{8,91}, \quad (14)$$

подставляя их в выражения (2-11).

Таким образом, при неизменной конструкции одновалковой зубчатой дробилки с целью обеспечения ориентировочной крупности готового продукта около 70 мм необходимо механически организовать подачу аглоспека со скоростью, одинаковой или близкой скорости движения спекательных тележек конвейерной агломашины, а скорость вращения ротора значительно увеличить.

#### **Выводы и направление дальнейших исследований.**

На базе теории многофакторного планирования экспериментов проанализиро-

ваны основные параметры технологического процесса дробления аглоспека, оказывающие влияние на крупность получаемых кусков агломерата, поступающего в доменные печи.

Максимально возможной крупности готового агломерата (7 мм) реально достичь путем снижения скорости подачи аглопилога под действие зубьев звездочки и существенным (30...40-кратным) увеличением частоты вращения ротора. При этом необходимо принять меры для минимизации последствий вентиляторного эффекта вращающихся частей.

В дальнейших исследованиях необходимо перейти к раскодированным значениям параметров функции отклика и выполнить оптимизацию методом квантования независимых переменных.

#### **Библиографический список**

1. Левченко, О. А. Повышение эффективности дробления агломерата путем усовершенствования конструктивных параметров одновалковой зубчатой дробилки [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.08 / Левченко Оксана Александровна; Донецк. гос. техн. ун-т. — Донецк, 2009. — 176 с.
2. Мороз, В. В. Параметрический анализ одновалковой зубчатой дробилки [Текст] / В. В. Мороз, Э. П. Левченко, А. М. Зинченко, О. А. Левченко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск: ДонГТУ, 2016. — Вып. 3(46.) — С. 161–168.
3. Мороз, В. В. Перспективы повышения эффективности доменной плавки путем стабилизации фракционного состава дробленого агломерата [Текст] / В. В. Мороз, Э. П. Левченко, О. А. Левченко // Современная наука: исследования, технологии, проекты: сборник материалов V международной научно-практической конференции. — М.: Изд-во «Перо», 2015. — С. 471–476.
4. Перов, В. А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых [Текст]: учеб. пособие для вузов; / В. А. Перов, Е. Е. Андреев, В. Ф. Биленко. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Недра, 2007. — 301 с.
5. Особенности математического моделирования механических процессов металлургических машин [Текст] / Э. П. Левченко и др. // Современные проблемы металлургических машин: НОЦ "МС". — Норт-Чарлстон: GreateSpase, 2016. — № 4(1). — С. 14–16.
6. Построение экспериментальных моделей физических процессов в дробильно-измельчительных устройствах: в двух частях: Ч. 2 / Э. П. Левченко и др.; под научн. ред. В. Л. Земляка [Текст] // Сборник материалов Международной заочной научно-практической конференции. — Биробиджан: ИЦ им. Шолом-Алейхема, 2016. — С. 90–95.
2. Левченко, О. А. Состояние и основные направления развития технического уровня конструкций одновалковых зубчатых дробилок [Текст] / О. А. Левченко, А. М. Зинченко, Э. П. Левченко // Металлургические процессы и оборудование. — 2011. — № 1. — С. 24–29.
3. Еронько, С. П. Моделирование процесса измельчения материала на одновалковой зубчатой дробилке [Текст] / С. П. Еронько, О. А. Левченко, Р. А. Удинцов // Металлургические процессы и оборудование, 2012. — № 1. — С. 17–24.

4. *Механическое оборудование металлургических заводов. Механическое оборудование фабрик окускования и доменных цехов [Текст] : учебн. для вузов / В. М. Гребеник и др. — К. : Выща школа, 1985. — 312 с.*

5. *Жилкин, В. П. Производство агломерата, оборудование, автоматизация [Текст] / В. П. Жилкин, Д. Н. Доронин. — Екатеринбург : Уральский центр ПР и рекламы, 2004. — 292 с.*

7. *Веденяпин, Г. В. Общая методика экспериментального исследования и обработка опытных данных [Текст] / Г. В. Веденяпин. — М. : Колос, 1967. — 188 с.*

© Мороз В. В.

© Левченко Э. П.

© Зинченко А. М.

© Левченко О. А.

*Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н., д.т.н., проф., зав. каф. МОЗЧМ ДонНТУ Еронько С. П.*

*Статья поступила в редакцию 27.01.17.*

**Мороз В. В., к.т.н. Левченко Е. П., к.е.н. Зинченко А. М., к.т.н. Левченко О. О. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)**

#### **АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗНИЖЕННЯ КРУПНОСТІ ГОТОВОГО АГЛОМЕРАТУ В ОДНОВАЛКОВІЙ ЗУБЧАСТІЙ ДРОБАРЦІ**

*Проаналізовано основні конструктивні та технологічні параметри одновалкової зубчастої дробарки гарячого агломерату з метою зниження крупності шматків в готовому продукті. Отримано поліноміальну математичну модель, що адекватно описує процес дроблення.*

**Ключові слова:** *одновалкова зубчаста дробарка, аналіз, конструктивні та технологічні параметри, моделювання, функція відгуку.*

**Moroz V. V., PhD in Engineering Levchenko E. P., PhD in Economics Zinchenko A. M., PhD in Engineering Levchenko O. A. (DonSTU, Alchevsk, LPR)**

#### **ANALYSIS OF POSSIBILITIES FOR REDUCING THE SIZE OF FINISHED SINTER IN SINGLE-SPINDLE ROLL CRUSHER**

*The main design and technological parameters of single-spindle roll crusher for hot agglomerate have been analyzed with a view to reduce cake size of the end-product. The polynomial mathematical model adequately describing the crushing process is obtained.*

**Key words:** *single-spindle roll crusher, analysis, design and technological parameters, modelling, response function.*