

УДК 531.31.15+669

Мороз В. В.,
к.ф.-м.н. Рубежанский В. И.,
к.т.н. Левченко Э. П.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

К ВОПРОСУ МНОГОСТАДИЙНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛА В ОДНОВАЛКОВОЙ ЗУБЧАТОЙ ДРОБИЛКЕ

Выполнен сравнительный анализ возможности подачи кусков агломерата звёздочками ротора одновалковой зубчатой дробилки с целью обеспечения многоступенчатого дробления на консольных колосниках и выявления условий сползания материала по мере его подъёма в верхнюю часть рабочей камеры. На основе уравнений Лагранжа подтверждена закономерность движения куска агломерата по плоскости зуба дробилки.

Ключевые слова: многостадийная одновалковая зубчатая дробилка, уравнения Лагранжа, закон движения, аналитический расчёт, сравнительный анализ.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Одним из главных направлений повышения эффективности работы доменных печей является увеличение их производительности и снижение расхода кокса [1].

Известно, что в настоящее время в технологически развитых странах, таких как Япония, США, Франция, Италия, ФРГ, используют железорудный материал в основном крупностью 5–35 мм, а фракции 0–5 мм в скипе содержится не более 5–7 % [2], что обеспечивает не только меньший удельный вынос пыли из колошника, но и наивысшие технико-экономические показатели работы доменной печи.

За рубежом агломерат подготавливают двухстадийным дроблением и четырёх- или пятикратным грохочением, хотя в целом общие единичные показатели работы этих машин остаются невысокими [3].

М. Ю. Рябчиков указывает, что для повышения эффективности работы доменной печи следует использовать агломерационное сырьё, имеющее стабильные форму, механическую прочность и гранулометрический состав с наименьшим количеством частиц размерами меньше 5 мм [4].

Изучение влияния параметров доменной плавки на результаты работы доменных печей в условиях ОАО «Уральская

сталь» на основе статистического анализа производственных данных, по мнению Д. А. Морозовой, подтверждает, что отсеб мелочи (0–5 мм) непосредственно перед загрузкой в скип повышает эффективность работы печи, а также сокращает расход топлива и способствует улучшению её газодинамики [5].

В связи с тем, что использование типовых конструкций одновалковых зубчатых дробилок для фрагментации агломерационного пирога не позволяет получить строго классифицированный агломерат фракционного состава, близкого к оптимальным размерам, предлагается создать в них условия многостадийного дробления. Именно работа таких машин в замкнутом цикле позволит исключить наличие крупных кусков, склонных в дальнейшем к саморазрушению, и обеспечить величину готового продукта на уровне передовых технологий.

Поэтому актуальным вопросом является организация в обычной одновалковой зубчатой дробилке, путем её несложного усовершенствования, многократного наложения усилий [6, 7], что требует всестороннего изучения таких процессов.

Постановка задачи. Задачей исследований является установление возможности организации подачи кусков агломерата в верхнюю часть многоступенчатой

модернизированной конструкции одновалковой зубчатой дробилки с помощью самих зубьев ротора и сравнение аналитических результатов, полученных по независимым методикам исследований.

Изложение материала и его результаты. В результате предыдущего анализа [8] возможности обеспечения подачи агломерата с помощью зубьев ротора на последующее многоступенчатое дробление по высоте рабочей камеры одновалковой зубчатой дробилки получено следующее дифференциальное уравнение движения куска по лопасти звёздочки ротора, вращающегося с постоянной угловой скоростью:

$$\ddot{X} + 2 \cdot \omega \cdot \dot{X} - \omega^2 X = g \cdot [-f \cdot \cos(\omega \cdot t + \alpha_1) - \sin(\omega \cdot t + \alpha_1)], \quad (1)$$

где X — перемещение куска агломерата; ω — угловая скорость вращения ротора; g — ускорение свободного падения; f — коэффициент трения; t — время движения; α_1 — угол начала движения куска агломерата по лопасти.

Решение данного уравнения, где учтены переносная и кориолисова силы инерции, имеет вид

$$X = C_1 \cdot e^{(k_1-b)t} + C_2 \cdot e^{-(k_1+b)t} + B_1 \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha_1) + B_2 \cdot f \cdot \cos(\omega \cdot t + \alpha_1), \quad (2)$$

где C_1 и C_2 — постоянные интегрирования; k_1 , b , B_1 , B_2 — известные функции угловой скорости ω вращения ротора и коэффициента трения f .

Для составления уравнений движения куска агломерата можно применить метод Лагранжа. Кусок агломерата в вертикальной плоскости имеет две степени свободы. В качестве обобщённых координат выберем: X — положение на зубе звёздочки, φ — угол отклонения зуба звёздочки от горизонтали (рис. 1).

Тогда общий вид уравнений Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dT}{dx} \right) - \frac{dT}{dx} = Q_x; \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dT}{d\varphi} \right) - \frac{dT}{d\varphi} = Q_\varphi,$$

где T — кинетическая энергия куска агломерата; Q_x и Q_φ — обобщённые силы, соответствующие выбранным координатам.

Кинетическая энергия:

$$T = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_{abc}^2, \quad (4)$$

где

$$\bar{V}_{abc} = \bar{V}_{отн} + \bar{V}_{пер}. \quad (5)$$

Здесь

$$\bar{V}_{отн} = \dot{x}; \quad V_{пер} = \omega \cdot x = \dot{\varphi} \cdot x.$$

Так как скорость $\bar{V}_{отн}$ направлена перпендикулярно скорости $\bar{V}_{пер}$, то

$$V_{abc}^2 = V_{отн}^2 + V_{пер}^2 = \dot{x}^2 + x^2 \cdot \dot{\varphi}^2.$$

В обобщённых координатах и обобщённых скоростях энергия примет вид

$$T = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(\dot{x}^2 + x^2 \cdot \dot{\varphi}^2 \right). \quad (6)$$

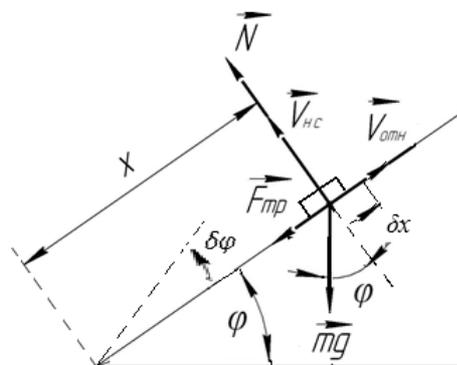


Рисунок 1 Схема для составления уравнений Лагранжа

Для вычисления обобщённых сил:

а) сообщим агломерату возможное перемещение, при котором $\delta x \neq 0$ ($\delta x > 0$), а $\delta \varphi = 0$.

Тогда сумма возможных работ, действующих на кусок агломерата

$$\sum_k \delta A_k = -F_{mp} \cdot \delta x - m \cdot g \cdot \sin \delta x = Q_x \cdot \delta x, \quad (7)$$

откуда

$$Q_x = -F_{mp} - m \cdot g \cdot \sin \varphi; \quad (8)$$

б) теперь $\delta x = 0$, а $\delta \varphi \neq 0$ ($\delta \varphi > 0$), что даёт

$$\sum_k \delta A_k = N \cdot x \cdot \delta \varphi - m \cdot g \cdot \cos \varphi = Q_\varphi \cdot \delta \varphi, \quad (9)$$

откуда

$$Q_\varphi = N \cdot x - m \cdot g \cdot \cos \varphi. \quad (10)$$

Подставляя найденные величины Q_x , Q_φ и требуемые производные функции энергии T в (3) получим дифференциальные уравнения сложного движения куска агломерата:

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{x} - m \cdot \dot{x} \cdot \dot{\varphi}^2 - F_{тр} - m \cdot g \cdot \sin \varphi; \\ 2 \cdot m \cdot \dot{x} \cdot \dot{\varphi} + m \cdot x^2 \cdot \ddot{\varphi} = N \cdot x - m \cdot g \cdot \cos \varphi. \end{cases} \quad (11)$$

Так как в поставленной задаче $\varphi = \omega = const$, то $\ddot{\varphi} = 0$ и второе уравнение даст возможность определить силу реакции:

$$N = m \cdot g \cdot \cos \varphi + 2 \cdot m \cdot \omega \cdot \dot{x}. \quad (12)$$

Заметим, что силу реакции N можно найти, применяя теорему об изменении момента количества движения материальной точки относительно центра O (рис. 1):

$$\frac{d}{dt} \left[m_o \left(\overset{-}{m} \cdot \overset{-}{V}_{a\bar{o}c} \right) \right] = \sum_{k=1}^3 \overset{-}{m}_o \left(\overset{-}{F}_k \right)$$

или в проекции на ось z

$$\frac{d}{dt} \left[m_z \left(\overset{-}{m} \cdot \overset{-}{V}_{a\bar{o}c} \right) \right] = \sum_{k=1}^3 \overset{-}{m}_z \left(\overset{-}{F}_k \right).$$

Вычислив соответствующие моменты количества движения и моменты сил, получим

$$\frac{d}{dt} [m \cdot (\omega \cdot x)] = -(m \cdot g \cdot \cos \varphi) \cdot x + N \cdot x,$$

или

$$m \cdot \frac{d\omega}{dt} \cdot x + 2 \cdot m \cdot \dot{x} \cdot \dot{\omega} = -(m \cdot g \cdot \cos \varphi) \cdot x + N \cdot x.$$

Последнее уравнение при равномерном вращении ротора дробилки $\omega = const$ и $\frac{d\omega}{dt} = 0$ даст выражение для

$$N = m \cdot g \cdot \cos \varphi + 2 \cdot m \cdot \omega \cdot \dot{x},$$

что совпадает с (12).

При силе трения $F_{тр} = f \cdot N$ первое уравнение даёт уравнение относительного движения куска агломерата:

$$\ddot{x} + 2 \cdot \omega \cdot f \cdot \dot{x} - \omega^2 \cdot x = -g \cdot \sin \varphi - f \cdot g \cdot \cos \varphi. \quad (13)$$

Особо отметим, что здесь угол φ следует принять отсчитываемым после начала относительного движения, т. е. $\varphi = \alpha_1 + \omega \cdot t$.

Дифференциальное уравнение (13), полученное с помощью уравнений Лагранжа, соответствует полученному ранее уравнению [8].

В таблице 1 приведены значения координат, скорости куска агломерата и углов положения плоскости зуба в зависимости от времени для различных угловых скоростей вращения ротора дробилки. Для значения времени 0,35 секунды при частоте вращения ротора дробилки $n = 12$ об/мин и коэффициенте трения $f = 0,5$ значение перемещения x становится меньше нуля, по-

этому в графе \dot{x} стоит прочерк в связи с отсутствием физического смысла.

Таблица 1

Значения координат, скорости куска агломерата и углов положения плоскости зуба в зависимости от времени

$n = 6 \text{ об/мин}; f = 0,5$				$n = 12 \text{ об/мин}; f = 0,5$				$n = 6 \text{ об/мин}; f = 0,364$		
$t, \text{ с}$	$x, \text{ м}$	$\varphi, ^\circ$	$\dot{x}, \text{ м/с}$	$t, \text{ с}$	$x, \text{ м}$	$\varphi, ^\circ$	$\dot{x}, \text{ м/с}$	$t, \text{ с}$	$x, \text{ м}$	$\varphi, ^\circ$
0	0,6	27,799	0	0	0,6	31,518	0	0	0,6	21,302
0,1	0,5577	31,399	-0,8603	0,1	0,5584	38,712	-0,8204	0,1	0,5657	24,902
0,2	0,4299	34,999	-2,2170	0,2	0,4368	45,918	-1,6098	0,2	0,4648	32,102
0,35	0,079	40,399	-3,3087	0,35	-0,1063	56,718	-	0,35	0,1793	33,902

Из анализа полученных результатов следует, что снижение коэффициента трения сказывается на замедленном перемещении куска агломерата от периферии зуба звёздочки к центру вращения ротора.

Снижение коэффициента трения, например, ввиду повышения температуры агломерата при частично расплавленном его состоянии (около 800 °С), приводит к тому, что кусок начинает своё сползание при меньших в 1,2–1,3 раза углах наклона лопасти зуба.

С увеличением частоты вращения ротора угол, с которого начинается сползание куска, возрастает, что можно обосновать большим влиянием центробежной силы, отталкивающей материал от центра вращения.

В качестве меры недопущения сползания материала из зоны действия консольных колосников наиболее простым вариантом можно предложить создание механического упора на зубе, препятствующего выходу кусков под действием силы тяжести из зоны воздействия рабочих органов дробилки.

Библиографический список

1. Левченко, О. А. Развитие технического уровня одновалковых зубчатых дробилок горячего агломерата [Текст] : монография / О. А. Левченко и др. — Алчевск : ДонГТУ, 2016. — 190 с.
2. Борискин, И. К. Интенсивная механическая обработка агломерата. Теория, оборудование, технология [Текст] / И. К. Борискин, Г. А. Арыков, А. Н. Пыриков. — М. : МИСИС, 1998. — 248 с.
3. Готлиб, А. Д. Доменный процесс [Текст] / А. Д. Готлиб. — М. : Металлургия, 1966. — 504 с.
4. Рябчиков, М. Ю. Изучение подходов к оценке влияния механической прочности агломерата на эффективность доменного процесса [Текст] / М. Ю. Рябчиков, В. В. Гребенникова, Н. В. Богданов // Инновации в материаловедении и металлургии : материалы IV международной интерактивной научно-практической конференции. — Екатеринбург : изд-во Урал ун-та, 2015. — С. 269–272.

5. Морозова, Д. А. Влияние параметров доменной плавки на результаты работы доменных печей в условиях ОАО «Уральская сталь» [Текст] / Д. А. Морозова, А. Н. Шаповалов, М. Г. Потапов // Теория и технология металлургического производства. — 2015. — № 1 (16). — С. 26–29.

6. Мороз, В. В. Способ многостадийной обработки агломерата в одновалковой зубчатой дробилке [Текст] / В. В. Мороз, Э. П. Левченко, Н. А. Бондарь // Современная металлургия нового тысячелетия : сборник научных трудов II международной научно-практической конференции. — Липецк : Изд-во Липецкого гос. техн. ун-та, 2016. — С. 271–275.

7. Мороз, В. В. Инновационный способ многостадийной обработки агломерационного спека в одновалковой зубчатой дробилке [Текст] / В. В. Мороз, Э. П. Левченко // Инновационные технологии в промышленности: образование, наука и производство : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. — Уфа : Нефтегазовое дело, 2016. — С. 398–400.

8. Мороз, В. В. Анализ обеспечения возможностей организации многостадийной работы одновалковой зубчатой дробилки [Текст] / В. В. Мороз, В. И. Рубежанский, Э. П. Левченко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2017. — Вып 5 (50). — С. 153–157.

© Мороз В. В.

© Рубежанский В. И.

© Левченко Э. П.

Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н., д.т.н., проф., зав. каф. АТ ЛНУ им. В. Даля Замотой Т. Н.

Статья поступила в редакцию 30.09.19.

**Мороз В. В., к.ф.-м.н. Рубежанский В. И., к.т.н. Левченко Э. П. (ДонГТУ, м. Алчевськ, ЛНР)
ДО ПИТАННЯ БАГАТОСТАДІЙНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛУ В ОДНОВАЛКОВІЙ
ЗУБЧАСТІЙ ДРОБАРЦІ**

Виконано порівняльний аналіз можливості подання шматків агломерату зірочками ротора одновалкової зубчастой дробарки з метою забезпечення багатоступеневого дроблення на консольних колосниках та виявлення умов сповзання матеріалу по мірі його підйому у верхню частину робочої камери. На основі рівнянь Лагранжа підтверджено закономірність руху шматка агломерату по площини зуба зірочки дробарки.

Ключові слова: багатостадійна одновалкова зубчаста дробарка, рівняння Лагранжа, закон руху, аналітичний розрахунок, порівняльний аналіз.

**Moroz V. V., PhD in Physics and Mathematics Rubezhanskiy V. I., PhD in Engineering
Levchenko E. P. (DonSTU, Alchevsk, LPR)
THE QUESTION OF MULTISTAGE MATERIAL PROCESSING IN A SINGLE ROLL
CRUSHER**

There has been done a comparative analytical analysis of possibility of feeding the pieces of sinter by rotor sprockets of a single roll crusher to ensure multistage crushing on the cantilever grating and identify the conditions of material sliding as it lifted to the upper part of the operating chamber. Basing on Lagrange equation there has been proved the regularity of motion of a piece of sinter along the plane tooth surface of a crusher.

Key words: multistage single roll crusher, Lagrange equation, law of motion, analytical calculation, comparative analysis.