

УДК 531.31.15+669

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

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ НА ЗАКОН ДВИЖЕНИЯ КУСКА АГЛОМЕРАТА В ОДНОВАЛКОВОЙ ЗУБЧАТОЙ ДРОБИЛКЕ

Приведены результаты анализа влияния переменного коэффициента трения на закон движения куска агломерата в рабочей полости многостадийной одновалковой зубчатой дробилки с целью вертикального расширения камеры дробления. Показано, что снижение величины динамического коэффициента трения скольжения приводит к расширению области дробления.

Ключевые слова: многостадийная одновалковая зубчатая дробилка, коэффициент трения, закон движения, аналитический расчёт, сравнительный анализ.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Измельчение как часть промышленного дробления и подготовки товарного агломерата требует рассмотрения нескольких этапов, а именно его поступления в загрузочную зону, нагружения до разрушения, создания условий дополнительного дробления, предотвращения последующей повторной агломерации фрагментов и т. п.

В связи с перспективным направлением повышения эффективности работы одновалковых зубчатых дробилок за счёт создания в рабочей камере многостадийного наложения усилий, целесообразно изучение такого процесса [1–3].

Предполагается обеспечить подачу материала в верхнюю часть дробильно-измельчительной машины под действие консольных колосников [4], что позволяет максимально использовать типовую конструкцию, широко применяемую в производстве агломерата, путём минимального её усовершенствования. При этом видоизменяется лишь колосниковая решётка, в весовом и конструктивном эквиваленте составляющая незначительную долю (5–8 %) от общего конструктива. Это обеспечивает малые материальные затраты на модернизацию дробилки, сопоставимые с затратами на осуществление плановых и текущих ремон-

тов, что является привлекательным с точки зрения совершенствования конструкций, применяемых в агломерационном производстве одновалковых зубчатых дробилок.

Средний номинальный срок службы колосниковой решётки, набранной из отдельных элементов, составляет около 3-х месяцев, при этом она подлежит замене при планово-предупредительных ремонтах самой дробилки [5].

Из проведённых ранее [4] аналитических исследований найдено, что дифференциальное уравнение относительного движения куска агломерата (рис. 1) по передней поверхности зуба звёздочки ротора имеет вид

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

где x — перемещение куска агломерата по наклонной лопасти звёздочки ротора; t — время его движения; ω — угловая скорость вращения ротора; f — коэффициент трения.

Уравнение (1) в случае относительного покоя груза даёт зону (сектор) равновесия, определяемую уравнением

$$\sin \alpha_{1,2} = \frac{\omega^2 \cdot x \pm \sqrt{g^2 \cdot (1 + f^2) - \omega^4 \cdot x^2}}{g \cdot (1 + f^2)}. \quad (2)$$

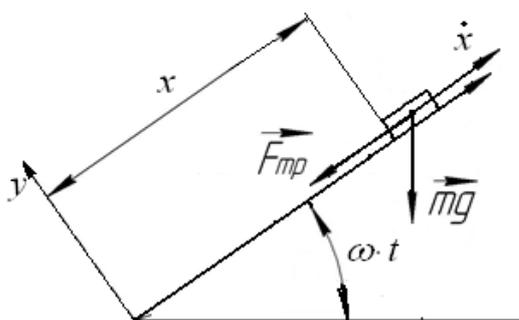


Рисунок 1 Расчётная схема движения

Зона относительного покоя куска агломерата в секторе дробления определяется углом $\alpha = \alpha_1 + |\alpha_2|$. Таким образом, размеры геометрических изменений при усовершенствовании камеры дробления зависят от угловой скорости вращения ротора и первоначального местоположения фрагмента дробимого материала. Отметим сразу, что изменение положения куска агломерата в результате его движения позволит прогнозировать конструктивные изменения в консольных колосниках.

Уравнение (1) при базовом варианте работы дробилки с угловой скоростью ротора $n = 6$ об/мин ($\omega = 0,6283 \text{ с}^{-1}$) и первоначальном расположении фрагмента агломерата от оси вращения на расстоянии $x = 0,6$ м имеет аналитические решения при постоянном коэффициенте трения:

при $f = 0,5$

$$x = -9,8186 \cdot e^{0,3883t} - 2,3493 \cdot e^{-1,0166t} + 7,4544 \cdot \sin(0,6283 \cdot t + 0,4852) + 9,9392 \cdot \cos(0,6283 \cdot t + 0,4852), \quad (3)$$

при $f = 0,364$

$$x = -9,713 \cdot e^{0,4399t} - 0,585 \cdot e^{-0,8973t} + 9,5171 \cdot \sin(0,6283 \cdot t + 0,3718) + 7,9867 \cdot \cos(0,6283 \cdot t + 0,3718). \quad (4)$$

Выбор значений коэффициента трения тела агломерата с плоскостью зуба ротора продиктован известным в металлургии [6, 7] диапазоном его изменения: $f = 0,5 \div 0,364$.

Анализ результатов на основании выражений (3) и (4) показывает (табл. 1), что уменьшение значения коэффициента трения снижает скорость сползания куска агломерата к оси ротора, оставляя его в области дробления больший промежуток времени.

Однако сектор дробления ($\alpha = 40,005^\circ$) при $f = 0,364$ меньше, чем при $f = 0,5$ ($\alpha = 53,12^\circ$).

Важность изучения поведения агломерата определяется расширением рабочей зоны дробильной камеры с точки зрения получения готового продукта более однородного фракционного состава.

С учётом того, что коэффициент трения скольжения зависит [8] от относительной скорости соприкасающихся поверхностей, актуальной задачей является выявление степени влияния коэффициента трения на закон движения агломерата при подаче куска в верхнюю часть камеры дробления.

Постановка задачи. Задачей исследований является установление зависимости движения фрагмента агломерата от изменения коэффициента трения при транспортировании куска зубьями звёздочек ротора в расширенную по высоте рабочую камеру одновалковой зубчатой дробилки.

Изложение материала и его результаты. Для большинства материалов [8] коэффициент трения f уменьшается с ростом относительной скорости движения соприкасающихся поверхностей (рис. 2).

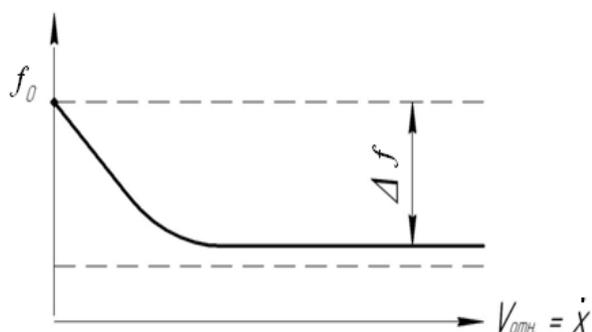


Рисунок 2 Изменение коэффициента трения в зависимости от скорости

Предположим, что изменение коэффициента f в зависимости от скорости движения куска реализуется в известных пределах $f=0,5 \div 0,364$ на длине плоскости зуба звёздочки ротора.

Результаты таблицы 1 позволяют предположить следующую зависимость:

$$f = 0,364 + 0,136 \cdot e^{-|x|}. \quad (5)$$

Дифференциальное уравнение движения (1) в этом случае примет вид

$$\ddot{x} + 2 \cdot \omega \cdot \left(0,364 + 0,136 \cdot e^{-|x|} \right) \cdot \dot{x} + \omega^2 \cdot x = -g \cdot \left[\begin{array}{l} (\sin \omega \cdot t + \alpha_1) + \left(0,364 + 0,136 \cdot e^{-|x|} \right) \times \\ \times \cos(\omega \cdot t + \alpha_1) \end{array} \right]. \quad (6)$$

Результаты численного решения нелинейного уравнения (6) приведены в таблице 1.

Аналитическое решение уравнения (1) позволяет выявить влияние условий ско-

рости вращения ротора на движение куска агломерата.

При $n=12$ об/мин и коэффициенте трения $f=0,5$ закон движения куска имеет вид

$$x = -1,9333 \cdot e^{0,7766t} - 0,5594 \cdot e^{-2,0392t} + 1,8637 \cdot \sin(1,2566 \cdot t + 0,5512) + 2,4849 \cdot \cos(1,2566 \cdot t + 0,5512). \quad (7)$$

Численные значения координаты груза и его скорости, полученные по закону (7), приведены в таблице 1.

На основании полученных расчётов схему многостадийной работы одновалковой дробилки можно представить в виде рисунка 3.

Введем рабочие понятия:

1. Рабочая область дробления — часть геометрической плоскости передней поверхности зуба, определяемая высотой консольных колосников, в которой происходит контакт куска агломерата с колосником.

2. Зона дробления — часть рабочей камеры, в которой происходит принудительное дробление.

Таблица 1

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

t, с	n = 6 об/мин				n = 6 об/мин; f = 0,364 + 0,136 · e ^{- x}			
	x, м	\dot{x} , м/с	φ , °	f	x, м	\dot{x} , м/с	φ , °	f
0	0,6	0	27,799	0,5	0,6	0	27,799	0,5
0,1	0,5577	-0,8603	31,399		0,5582	-0,8273	31,399	0,4235
0,2	0,4299	-2,2170	34,999		0,4619	-1,6210	34,999	0,3909
0,35	0,079	-3,3087	40,399		0,1314	-2,7869	40,399	0,3724
n = 6 об/мин					n = 12 об/мин			
0	0,6	0	21,302	0,3645	0,6	0	31,581	0,5
0,1	0,5657	-0,6746	24,902		0,5584	-0,8204	38,781	
0,2	0,4648	-1,3665	28,502		0,4368	-1,6038	45,982	
0,35	0,1793	-2,4363	33,902		-0,1063		56,181	

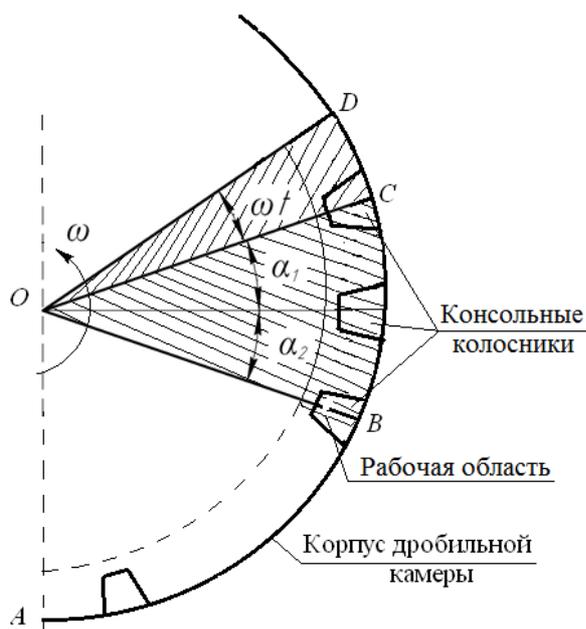


Рисунок 3 Схема многостадийной работы и зоны дробления

На рисунке 3 показаны:

1. Зона OAB — сектор, в котором фрагменты агломерата всегда попадут в рабочую область дробления.
2. Зона OBC — зона относительного покоя куска агломерата; фрагменты, оказавшиеся в рабочей области этой зоны, испытывают нагрузку дробления.
3. Зона OCD — зона расширения сектора OBC . Она зависит от ширины рабочей области и закона движения $x(t)$ куска агломерата.

Библиографический список

1. 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.
2. 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.
3. 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 : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2017. — Вып 5 (50). — С. 153–157.

Выводы и направление дальнейших исследований. Анализ результатов (табл. 1) позволяет сделать выводы.

При граничных значениях коэффициента трения $f=0,5$ и $f=0,364$ скорость сползания куска агломерата к оси вращения ротора меньше, чем при $f=0,364$. Это замедление является предпочтительным для нахождения куска в рабочей области дробления. Такое замедление движения при меньших значениях коэффициента f объясняется влиянием переносной силы инерции по сравнению с силой трения, зависящей от кориолисовой силы инерции.

Эта тенденция сохраняется и при принятом законе изменения коэффициента трения в зависимости от скорости скольжения. Более того, сектор дробления OBC зависит только от начального значения коэффициента трения, а его расширения — от принятых конструктивных размеров высоты консольных колосников.

Увеличение частоты вращения ротора в два раза по сравнению с номинальной величиной не вызывает изменения величины зоны относительного покоя куска (она составляет $53^{\circ}12'$), но её положение смещается в сторону вращения ротора, расширяя таким образом зону дробления.

В перспективе дальнейших исследований предполагается экспериментальная проверка полученных теоретических предпосылок.

4. Мороз, В. В. К вопросу многостадийной обработки материала в одновалковой зубчатой дробилке [Текст] / В. В. Мороз, В. И. Рубежанский, Э. П. Левченко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2019. — Вып. 15 (58). — С. 43–47.

5. Левченко, О. А. Развитие технического уровня одновалковых зубчатых дробилок горячего агломерата [Текст] : монография / О. А. Левченко и др. — Алчевск : ДонГТУ, 2016. — 190 с.

6. Коротич, В. И. Теоретические основы технологий окускования металлургического сырья. Агломерация [Текст] : учебное пособие / В. И. Коротич, Ю. А. Фролов, Л. И. Капун. — Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2009. — 417 с.

7. 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.

8. Хайкин, С. Э. Физические основы механики [Текст] / С. Э. Хайкин. — М. : Наука, 1971. — 751 с.

© Мороз В. В.

© Рубежанский В. И.

© Левченко Э. П.

© Зинченко А. М.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А.,
нач. бюро агломерационного производства
Филиала № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС» Куценко Е. В.*

Статья поступила в редакцию 22.01.20.

Мороз В. В., к.ф.-м.н. Рубежанский В. И., к.т.н. Левченко Э. П., к.е.н. Зинченко А. М.
(ДонГТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ВПЛИВ КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ НА ЗАКОН РУХУ ШМАТКА АГЛОМЕРАТУ В ОДНОВАЛКОВІЙ ЗУБЧАСТІЙ ДРОБАРЦІ

Наведено результати аналізу впливу змінного коефіцієнта тертя на закон руху шматка агломерату в робочій порожнині багатостадійної одновалкової зубчастій дробарки з метою вертикального розширення камери дроблення. Показано, що зниження величини динамічного коефіцієнта тертя приводить до розширення області дроблення.

Ключові слова: багатостадійна одновалкова зубчаста дробарка, коефіцієнт тертя, закон руху, аналітичний розрахунок, порівняльний аналіз.

**Moroz V. V., PhD in Physics and Mathematics Rubezhanskiy V. I.,
PhD in Engineering Levchenko E. P., PhD in Economics Zinchenko A. M. (DonSTU, Alchevsk, LPR)**
**EFFECT OF FRICTION COEFFICIENT ON THE LAW OF MOTION OF A PIECE OF
SINTER IN A SINGLE-ROLL CRUSHER**

There have been given the results of analytical analysis of the influence of the variable friction coefficient on the law of motion of a piece of sinter in the working space of a multistage single-roll crusher for the vertical expansion of the crushing chamber. It is shown that a decrease in the value of the dynamic coefficient of sliding friction leads to an expansion of the crushing area.

Key words: multistage single-roll crusher, friction coefficient, law of motion, analytical calculation, comparative analysis.