

УДК 62-133.2+669

Власенко Д.А.,  
к.т.н. Левченко Э.П.,  
Павлиненко О.И.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

## АНАЛИЗ ОТКЛОНЕНИЯ МОЛОТКОВ С КОМБИНИРОВАННЫМ КРЕПЛЕНИЕМ БИЛ В ДРОБИЛКАХ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

*На основании определения взаимодействия сил при взаимном контакте молотков с частицей известняка приведены результаты исследований угла отклонения бил в молотковой дробилке в момент удара при сравнительном анализе процесса дробления с различным количеством жестко закрепленных молотков в ряду и массы частицы материала. В результате исследований выявлена зависимость угла отклонения бил от количества жестко закрепленных молотков на оси и от массы частицы известняка.*

**Ключевые слова:** угол отклонения молотков, молотковая дробилка, била, диспергирование известняка

Анализ дробильных машин, применяемых в агломерационном производстве, а именно в технологии производства агломерата, указывает, что существенное влияние на качество агломерационного сырья для доменных печей оказывают не только процессы, протекающие при окусковании железной руды в результате спекания, но и устойчивость агломерата к механическим процессам саморазрушения при его производстве. При этом именно оптимальная крупность компонентов шихты выступает определяющим фактором в процессе производства агломерата.

С учетом вышесказанного, для усовершенствования агломерационного производства необходимо оптимизировать процессы подготовки шихтовых составляющих, в частности процессы дробления известняка.

Вопросы подготовки сырых флюсов к агломерации, связанные с диспергированием известняка в дробилках, с точки зрения получения оптимальной крупности являются основополагающими вследствие своего непосредственного и существенного влияния на производительность процесса агломерации [1].

В настоящее время в металлургической промышленности при дроблении известняка в агломерационном производстве ис-

пользуют молотковые дробилки с шарнирно подвешенными молотками [2]. В таких конструкциях из-за нежесткого крепления молотков происходит потеря эффективности разрушения за счет отклонения молотка при его соударении с кусками материала.

В дробильных агрегатах с комбинированным креплением бил [3] угол отклонения уменьшается, при этом снижается износ рабочих органов [4] за счет увеличения импульса молотков, жестко закрепленных на оси.

Комбинированный способ крепления молотков предполагает взаимосвязанную неподвижную установку молотков в ряду, когда при соударении с материалом взаимодействует масса не одного молотка, а некоторого количества их, набранных в единый узел [4].

Сравнительное сопоставление угла отклонения бил в молотковых дробилках с комбинированным креплением молотков к оси ротора заключается в анализе действия сил и определении изменения угла отклонения ударных элементов в момент соударения с материалом при различном количестве жестко закрепленных молотков на оси. При подаче известняка в дробилку ударного типа с шарнирным подвесом бил, как в молотковой дробилке, некоторое ко-

личество энергии расходуется на отклонение молотков от своего радиального положения, в результате чего снижается эффективность процесса дробления и увеличиваются энергозатраты. Это обусловлено тем, что ударный импульс по материалу передается молотку и энергия, направленная на разрушение, частично уходит на преодоление сил инерции молотков, которые, в свою очередь, являются результатом действия на молотки центробежной силы. В роторных дробилках с комбинированным креплением молотков такое явление отсутствует. Поэтому рациональным является рассмотрение процессов, влияющих на перераспределение энергии в этих двух типах машин в сравнительном анализе.

Рассмотрим действие одиночных ударов молотков дробилки в момент взаимодействия рабочих органов с частицей известняка, когда противодействием силе удара молотков является инерция кусков. При этом делается допущение, что между сырьем и молотком возникает упругий, прямой центральный удар. Схема проникновения кусков известняка в рабочую зону и положение молотков до и после удара представлены на рисунке 1.

Дробление материала наиболее эффективно при центральном ударе, т. е. при глубине проникновения частицы в зону вращающихся молотков на величину [5]

$$c \geq 0,6 \cdot D_{\max}, \quad (1)$$

где  $D_{\max}$  – максимальный диаметр частиц сырья.

Молоток при ударе отклоняется относительно точки подвеса от своего радиального положения и одновременно вращается вместе с ротором в окружном направлении.

По закону сохранения импульса [6], с учетом количества молотков:

$$n \cdot m_M (V' - V) = F_B - F_D, \quad (2)$$

где  $n$  – количество жестко закрепленных молотков в ряду;  $m_M$  – масса одного молотка;  $V'$  и  $V$  – окружные скорости центра массы молотка, соответственно, до и после удара;  $F_B$ ,  $F_D$  – импульсы удара, соответственно, в точке В и точке D (рис. 1б).

На основе теории об изменении количества движения центра массы, а также принимая во внимание, что скорость центра

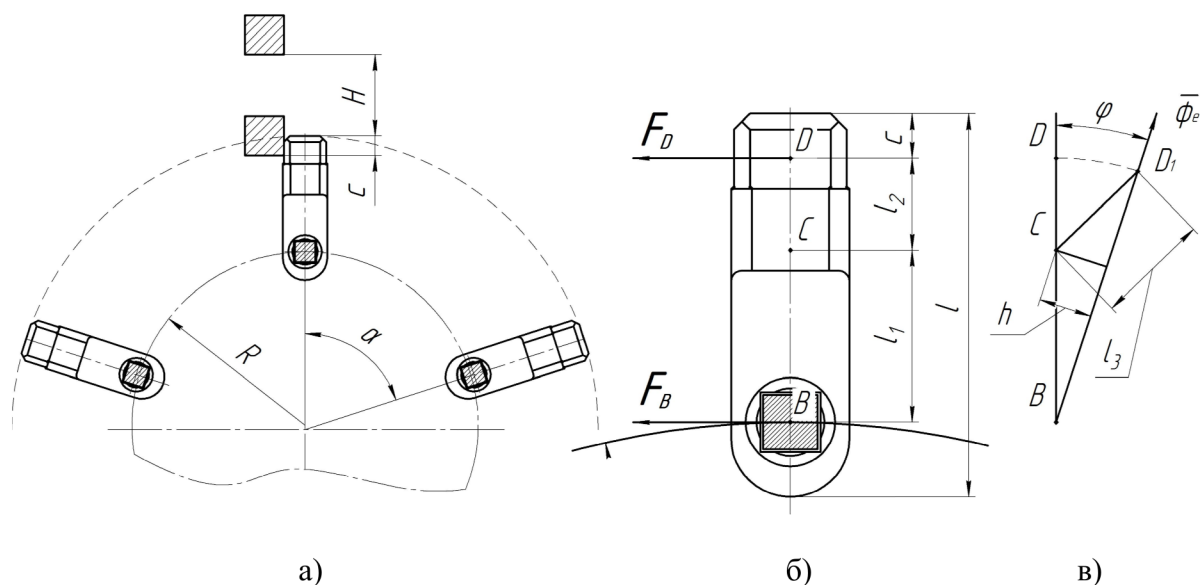


Рисунок 1 – Схемы к определению:

а - глубины проникновения частицы в зону вращающихся молотков; б - положения молотка до удара по куску материала; в – положение молотка после удара по материалу

массы молотка относительно оси подвеса в начале удара равна нулю, скорость куска материала по направлению движения центра тяжести молотка также равна нулю, с учетом требований, что ось подвеса не должна испытывать ударного импульса ( $F_B=0$ ), применяя методику [5], имеем:

$$F_D = n \cdot m_M \cdot V, \quad (3)$$

где  $V = l_1 \cdot \omega_M$  – линейная скорость центра массы молотка в конце удара относительно оси подвеса;  $\omega_M$  – угловая частота вращения молотка в конце удара относительно оси подвеса (точка В).

Или:

$$F_D = n \cdot m_M \frac{F_D(l_1 + l_2)}{J_{zz}} l_1, \quad (4)$$

где  $J_{zz}$  – момент инерции молотка относительно оси подвеса;  $l_1$  – расстояние до центра тяжести молотка;  $l_2$  – расстояние от центра тяжести молотка до точки (С) приложения удара (рис. 1-б).

Из уравнения (4) получаем:

$$J_{zz} = n \cdot m_M \cdot (l_1^2 + l_1 l_2). \quad (5)$$

При этом, согласно требованиям к молотковым дробилкам, на ось подвеса молотков, а, следовательно, на подшипники ротора не передается удар молотка по куску материала ( $F_B=0$ ).

Момент инерции молотков при их вращении:

$$J_{zz} = \frac{n \cdot m_M \cdot l^2}{12} + n \cdot m_M l_1^2, \quad (6)$$

где  $l$  – полная длина молотка.

Совместным решением уравнений (5) и (6) определяем размер  $l_1$  или, при известных размерах молотка, величину  $c$ .

После удара предполагаем, что молоток отклоняется на угол  $\varphi_{max}$  и поддерживается в равновесном состоянии за счет центробежной силы. Тогда, не учитывая вес молотка в его новом положении, на основе

теоремы изменения кинетического момента [6] можно записать:

$$\begin{aligned} m_k V_0 (l_1 + l_2) &= \\ &= J_{zz} \omega_0 + m_k V_k' (l_1 + l_2), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $m_k$  – масса куска материала;  $V_0$  – скорость молотка до удара;  $V_k$  – скорость куска материала после удара;  $\omega_0$  – угловая скорость поворота молотка относительно оси его подвеса (точки В) после удара;  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора.

В данном уравнении левый член является кинетическим моментом массы частицы до удара, правый – суммарным кинетическим моментом самого молотка и куска материала.

При упругом ударе частица материала приобретает скорость, равную скорости молотка, обусловленную вращением ротора:

$$V_k' = -V_0 = \omega(R + l_1 + l_2), \quad (8)$$

где  $R$  – радиус подвеса молотков.

Угловая скорость молотка после удара:

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \frac{m_k (l_1 + l_2) (V_0 - V_k')}{J_{zz}} = \\ &= \frac{2m_k (l_1 + l_2) \omega (R + l_1 + l_2)}{J_{zz}}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $m_k$  – масса куска материала.

Для движения молотка после удара запишем теорему об изменении кинетической энергии, пренебрегая силами тяжести и поворотом ротора за время отклонения молотка на угол  $\varphi_{max}$ :

$$\frac{J_{zz} \omega_0^2}{2} = \int_0^{\varphi_{max}} F_u h d\varphi, \quad (10)$$

где  $F_u$  – переносная сила инерции.

Из треугольника  $BCD_1$  (рис. 1-в) следует, что:

$$(l_1 + l_3)^2 = l_1^2 + l_3^2 + l_1 l_3 \cos \varphi_{max}, \quad (11)$$

где  $l_3$  – расстояние  $CD_1$  на рисунке 1-в.

Площадь треугольника  $S_{\Delta BCD_1}$ , исходя из схемы, характеризующей положение молотка после удара по материалу, изображенной на рисунке 1-в, выразим таким образом:

$$S_{\Delta BCD_1} = \frac{1}{2}(l_1 + l_2)h = \frac{1}{2}l_1l_2 \sin(180 - \varphi_{\max}) \quad (12)$$

где  $h$  – высота треугольника  $B CD_1$ .

Отсюда перемещение центра тяжести молотка при его отклонении в момент удара запишется так:

$$h = \frac{l_1l_3 \sin \varphi_{\max}}{l_1 + l_3} \quad (13)$$

Переносная сила инерции:

$$F_u = m_k \omega^2 (l_1 + l_2). \quad (14)$$

Из уравнения (10), используя выражение (11), получаем:

$$\frac{J_{zz} \omega^2}{2} = n \cdot m_m \omega^2 (l_1 + l_2) \times \int_0^{\varphi_{\max}} \frac{l_1l_3}{(l_1 + l_2)} \sin \varphi d\varphi m_m \omega^2 l_1l_3 \times (1 - \cos \varphi_{\max}). \quad (15)$$

Отсюда:

$$\cos \varphi_{\max} = 1 - \frac{J_{zz} \omega_0^2}{2n \cdot m_m \omega^2 l_1l_3}. \quad (16)$$

Используя выражение (9), получаем:

$$\cos \varphi_{\max} = 1 - \frac{2m_k^2 (l_1 + l_2)^2 (R + l_1 + l_2)^2}{J_{zz} n \cdot m_m l_1l_3}. \quad (17)$$

Задаваясь размером куска, можно вычислить  $l_3$ , а затем величину  $\varphi_{\max}$  – угол максимального отклонения молотка.

Определим глубину проникновения частицы материала в рабочую зону молотков с учетом [7]:

$$c = V_k t = \sqrt{2gh_c} \cdot t = \sqrt{2gh_c} \cdot \frac{2\pi}{k\omega}, \quad (18)$$

где  $k$  – количество рядов молотков.

Тогда

$$l_3 = \sqrt{(l_1 + l_2)^2 + l_2^2 - 2(l_1 + l_2)l_1 \cos \varphi}. \quad (19)$$

Решая совместную систему уравнений (17) и (19) средствами математического пакета Mathcad получаем зависимость угла отклонения от количества молотков, жестко закрепленных на оси ротора, отображенную графически на рисунке 2.

Из анализа полученной зависимости следует, что роторные дробильно-измельчительные машины ударного действия с комбинированным креплением бил ротора, с точки зрения энергосбережения, являются более предпочтительными, чем молотковые машины с шарнирным креплением молотков. Причем, с увеличением фракционного состава материала, подаваемого на дробление, кинетическая энергия молотка, передаваемая кускам сырья, резко падает.

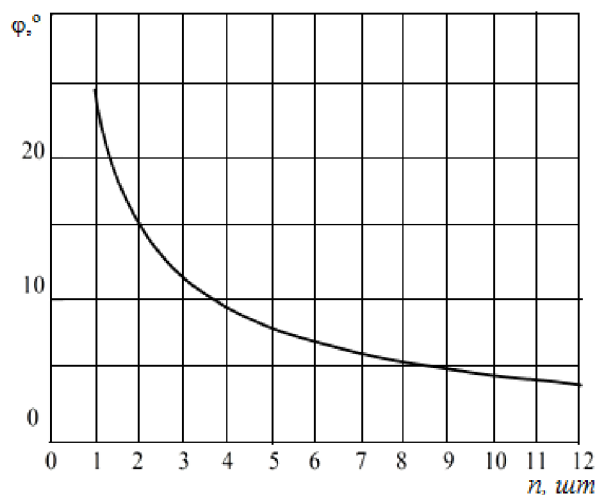


Рисунок 2 – График зависимости угла отклонения молотка от количества жестко закрепленных молотков на оси

Выводы и направление дальнейших исследований.

1. Угол отклонения шарнирно подвешенного молотка в молотковой дробилке существенно увеличивается при возрастании размера куска дробимого материала, а при комбинированном креплении, в зави-

симости от количества жестко закрепленных молотков, резко уменьшается.

2. Перспективным направлением дробления и измельчения, с точки зрения повышения качества известняка, является синтез новых конструкций дробилок, совмещаю-

щих в себе комбинацию жесткого крепления бил в процессе дробления материала при возможности их предохранения от разрушения, например, за счет потери жесткости при контакте с недробимыми телами.

### Библиографический список

1. Миончинский П.Н. Производство комбикормов / П.Н. Миончинский, Л.С. Кожарова — М. : Агропромиздат, 1996. — 288 с.
2. Поздняков В.Д. Улучшение работы молотковой дробилки за счёт совершенствования её конструктивной схемы / В.Д. Поздняков, А.С. Кусаков // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. — 2011 — Вып. № 31–1. — Том 3.
3. Власенко Д.А. Эффективность дробления известняка в дробилках с вращающимся ротором при реализации различных способов воздействия на материал ударом / Д.А. Власенко // «Молодежь и XXI век -2016»: Материалы VI Международной молодежной научной конференции. — 2016. — С. 94–98.
4. Власенко Д.А. Способы снижения износа молотков дробилок ударного действия / Д.А. Власенко, Э.П. Левченко, Д.А. Вишневский, С.А. Красовский, А.А. Назаренко. // Современные материалы, техника и технологии. Научно-практический журнал. — 2016. — Вып. №2(5). — С. 63–69.
5. Технические характеристики молотковых дробилок [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://studopedia.org/1-114625.html>
6. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики / С.М. Тарг. — М. : Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1963. — 480 с.
7. Патент на корисну модель 59030 А МПК<sup>7</sup> В 02 С 13/16. Спосіб подрібнення зерна та пристрій для його реалізації / Левченко Е.П., Кір'язев П.М.; заявник і патентовласник ДГМІ. — № 2002129841; заявл. 09.12.02; опубл. 15.08.03, Бюл. № 8. — 2 с.: іл.

Рекомендована к печати к.т.н., проф. ДонГТУ Ульяницким В.Н.,  
д.т.н., проф. ЛТУ Харламовым Ю.А.

Статья поступила в редакцию 16.05.16.

Власенко Д.О., к.т.н. Левченко Е.П., Павлиненко О.І. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

### АНАЛІЗ ВІДХИЛЕННЯ МОЛОТКА З КОМБІНОВАНИМ КРІПЛЕННЯМ БИЛ У ДРОБАРКАХ УДАРНОЇ ДІЇ

На підставі визначення взаємодії сил при взаємному контакті молотків з часткою вапняку наведені результати досліджень кута відхилення бил в молотковій дробарці в момент удару при порівняльному аналізі процесу дроблення з різною кількістю жорстко закріплених молотків в ряду і маси частинки матеріалу. В результаті досліджень виявлено залежність кута відхилення бил від кількості жорстко закріплених молотків на осі і від маси частинки вапняку.

**Ключові слова:** кут відхилення молотків, молоткова дробарка, била, розпорошення вапняку.

Vlasenko D.A., PhD in Engineering Levchenko E.P., Pavlinenko O.I. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

### ANALYSIS OF HAMMERS DEFLECTION WITH COMBINED FASTENING OF BEATER RODS IN IMPACT CRUSHER

Basing on the interaction of forces at hammers reciprocal contact with lump lime particles there are shown the investigation results of the deflection angle of beater rods in hammer grinder at impact moment using the comparative analysis of grinding with various number of hard-mounted hammers in a line and a mass of material fraction. The investigations resulted in determining the dependence of deflection angle of beater rods on a number of hard-mounted hammers in axis and a mass of lump lime fractions.

**Key words:** angel of hammers deflection, hammer grinding, beater rod, lump lime dispersion.