

ПОЛУЧЕНИЕ ДОЛОМИТОВОГО ЩЕБНЯ В ЦЕНТРОБЕЖНО-УДАРНОЙ ДРОБИЛКЕ

Докт. техн. наук, проф. БУСЕЛ А.В.¹⁾, асп. БУКО А.Н.²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет,

²⁾Департамент «Белавтодор»

Для придания каменным материалам требуемых потребительских и технологических свойств широко используются операции их измельчения. В настоящее время все большее применение находит центробежно-ударный способ дробления. Низкие энергозатраты и высокая эффективность при измельчении хрупких каменных материалов ставят центробежно-ударные дробилки в ряд наиболее перспективных [1, 2]. Эти агрегаты позволяют реализовать способ измельчения свободным ударом, при котором дробление осуществляется с низким выходом частиц игольчатой и лещадной формы (не более 10 % по массе). Разрушение кусков каменного материала происходит по границам спайности минералов и внутренним трещинам, что приводит к селективному дроблению с получением зерен максимально цельного материала. Полученные в результате такого дробления частицы практически лишены внутренних дефектов, что повышает их прочность на сжатие по отношению к прочности кусков исходного материала.

Принцип действия центробежно-ударной дробилки основан на разгоне кусков материала под действием центробежных сил до скоростей, существенно превышающих критическую скорость, необходимую для ударного разрушения. Поэтому в рассматриваемой дробилке имеется камера дробления, где происходит удар разогнанных кусков об отбойное кольцо (рис. 1).

При соприкосновении с отбойным кольцом измельчаемый кусок материала получает точку контакта, в которой действует ударная сила P , стремящаяся разорвать связи, осуществляющие сцепление в материале. В наиболее уязвимых местах происходит разрушение исходного куска материала по их границам.

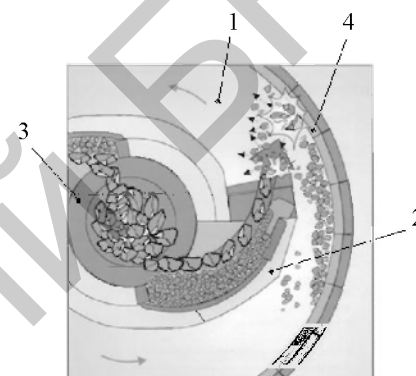


Рис. 1. Удар кусков материала об отбойное кольцо дробилки: 1 – камера дробления; 2 – лопасть; 3 – ротор; 4 – отбойное кольцо

Расчет параметров разрушения усложнен тем, что на различных участках измельчаемого куска материала в результате его контактов с другими частицами возникают напряжения смятия, изгиба, сжатия, сдвига и растяжения. Процесс разрушения зависит от следующих факторов: вида удара (прямой или косой); прочности связей между частицами в исходном материале; наличия дефектов структуры материала; геометрической формы кусков исходного материала; конфигурации поверхности отбойных колец. Параметры процесса разрушения определяются:

- значением абсолютной скорости удара кусков материала об отбойную поверхность мельницы;
- величиной критической скорости разрушения кусков данного материала;
- траекторией движения кусков исходного материала в пределах зоны измельчения;
- углом установки отбойных элементов по отношению к радиусу мельницы.

Предпочтительным видом разрушения кусков исходного материала в помольной камере мельницы является разрушение посредством высокоскоростного центрального (прямого) удара об отбойную поверхность. В данном случае кинетическая энергия кусков материала максимально используется для разрушения с минимальными непроизводительными потерями. При этом значительно снижается количество рикошетирующих крупных осколков дробимого материала от отбойной поверхности на ускоритель дробилки. Это, в свою очередь, приводит к определенному увеличению срока службы рабочих элементов ускорителя и снижению капитальных затрат на их замену или восстановление.

По мере поступления исходного материала в центробежно-ударную дробилку каждый его кусок испытывает за доли секунды стремительное ускорение и торможение (рис. 2) [3]. В камере дробления создается вращающаяся среда с высокой насыщенностью кусками материала, движущимися хаотически и обладающими большой кинетической энергией.

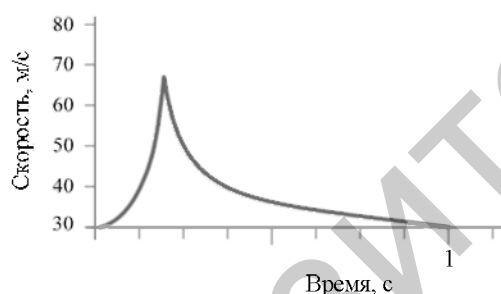


Рис. 2. Скорость движения кусков каменного материала

Из [3] известно, что теоретическая скорость вылета кусков дробимого материала v_b из ротора с радиальными лопастями с учетом коэффициента трения f между измельчаемым материалом и лопастями ротора больше скорости концов лопастей v_n в 1,25 раза.

Окружная скорость концов лопастей ротора v_n (м/с) определяется из уравнения

$$v_n = \frac{\pi n R}{30}, \quad (1)$$

где n — частота вращения ротора, об/с; R — радиус окружности, описываемой концом лопасти, м.

Кинетическая энергия, потерянная телами при неупругом ударе, равна кинетической энергии, соответствующей их потерянному скоростям [4].

Рассматривая удар дробимого материала об отбойное кольцо, запишем уравнение кинетической энергии

$$T_0 - T = \frac{mv_b^2}{2} - \frac{mv_k^2}{2}, \quad (2)$$

где T_0 — кинетическая энергия материала до удара; T — кинетическая энергия разрушенных кусков материала после удара; m — масса материала; v_b — скорость куска материала, приобретаемая в ускорителе в момент вылета; v_k — средняя скорость кусков после удара измельчаемого материала об отбойные кольца и его разрушения.

Ориентировочно скорость кусков материала после удара и разрушения на два порядка меньше скорости частиц измельчаемого материала до удара, поэтому можно считать, что кинетическая энергия материала T после удара составляет 1–2 % от T_0 .

Работа A , израсходованная на разрушение дробимого материала, равна потере кинетической энергии материала при ударе

$$A = (0,98-0,99)T_0. \quad (3)$$

При ударе куска каменного материала об отбойное кольцо в месте их соприкосновения возникают деформации [5], которые приводят к разрушению. Работа, израсходованная на разрушение, будет выполнена ударной силой P на деформации Δd

$$A = P\Delta d. \quad (4)$$

Тогда ударная сила P

$$P = \frac{A}{\Delta d}. \quad (5)$$

Отсюда видно, что в первую очередь будут разрушаться более хрупкие куски материала, для которых $\Delta d \rightarrow 0$.

Подставив выражение (4) в (3), получим

$$P\Delta d = (0,98-0,99)T_0$$

или

$$P\Delta d = (0,98-0,99)\frac{mv_b^2}{2}. \quad (6)$$

Согласно [6], сила удара P (Н), вызывающая разрушение кусков дробимого материала, определяется по формуле

$$P = \sigma_b d^2, \quad (7)$$

где σ_b – предел прочности измельчаемого материала, МПа; d – размер куска материала, условно принятого в виде куба, мм.

Тогда из выражения (6) скорость удара куска со стороны d , необходимая для его разрушения, будет определяться по формуле

$$\begin{aligned} v_p &= K_\alpha \sqrt{\frac{2\sigma_b d^2 \Delta d}{(0,98-0,99)m}} = K_\alpha \sqrt{\frac{2\sigma_b d^2 \Delta d}{(0,98-0,99)\rho d^3}} = \\ &= K_\alpha \sqrt{\frac{2\sigma_b \Delta d}{(0,98-0,99)\rho d}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где ρ – плотность материала, кг/м³; K_α – коэффициент, учитывающий вид удара кусков каменного материала об отбойное кольцо; при прямом ударе $K_\alpha = 1,0$ (угол атаки $\alpha = 90^\circ$), при косом – $K_\alpha = 1,8-2,2$ ($\alpha < 90^\circ$).

Таким образом, при ударном воздействии на дробимый материал прежде всего будут разрушаться куски с большей массой.

При прочности доломита $\sigma_b = 130$ МПа, плотности $\rho = 2000$ кг/м³, среднем размере кусков $d = 50$ мм, деформации $\Delta d = 3$ мм и среднем коэффициенте вида удара $K_\alpha = 2$ величина скорости удара кусков дробимого материала об отбойную плиту, рассчитанная по зависимости (8), составляет $v_p = 56,2$ м/с. Реализация прямого удара ($\alpha = 90^\circ$) позволит снизить необходимую для разрушения скорость удара кусков до 28,1 м/с ($K_\alpha = 1,0$), что приведет к существенному снижению энергозатрат при дроблении доломитового щебня.

После подстановки выражения (1) в (6) с учетом того, что $v_b \approx 1,25v_d$, получаем расчетную ударную нагрузку, разрушающую материал

$$P = (0,0084-0,0085) \frac{mn^2 R^2}{\Delta d}. \quad (9)$$

Из выражения (9) видно, что сила удара кусков об отбойную поверхность будет тем

больше, чем больше масса куска дробимого материала, частота вращения и радиус окружности конца лопасти центробежно-ударной дробилки. Регулируя эти параметры можно оптимизировать процесс дробления.

Расчет энергоемкости процесса дробления затруднен тем, что в настоящее время отсутствуют аналитические методы, позволяющие определить количество и размер частей, на которые распадается исходный кусок материала под действием известных сил. Обычно исходный материал представляют в виде сыпучей среды, состоящей из однородных по химическому составу, но разнородных по размеру и форме отдельных кусков. Точный расчет энергозатрат на дробление затруднен значительным влиянием на процесс разрушения дефектов структуры материала, а также хаотическим распределением кусков материала между собой.

Тем не менее исследователями [3] установлено, что удельный расход энергии с увеличением скорости вращения ротора повышается по степенной зависимости

$$\mathcal{E}_{уд} = K \left(\frac{n}{1000} \right)^p, \quad (10)$$

где $\mathcal{E}_{уд}$ – удельный расход энергии на однократное дробление; K – удельный расход энергии при скорости вращения ротора 1000 об/мин; p – показатель степени, равный 2,30–2,35.

Связь между остатками дробленого материала на ситах и удельным расходом энергии имеет вид [3]

$$R_s = R_0 e^{-k_s \mathcal{E}_{уд}^m}, \quad (11)$$

где R_s, R_0 – остаток на определяющем сите при каком-либо расходе энергии и при начальных условиях; k_s – коэффициент, характеризующий относительную скорость измельчения, который зависит от вида измельчаемого материала, его крупности и конструкции ускорителя; m – параметр, характеризующий изменение относительной скорости измельчения.

Мощность, потребляемая центробежной дробилкой, расходуется на: преодоление трения в подшипниках и передаче; преодоление сопротивления воздуха и его перемещение (вен-

тиляционный эффект); процессы дробления. Она определяется по следующей формуле:

$$N = N_x + N_{уд} П, \quad (12)$$

где N – суммарная мощность, расходуемая дробилкой; N_x – мощность, расходуемая на холостой ход дробилки; $N_{уд}$ – то же на процессы дробления при производительности 1 т/ч; $П$ – производительность дробилки.

На экспериментальной базе НПО «Центр» были проведены опытно-технологические работы по центробежно-ударному дроблению доломитового щебня из смеси фракций 20–60 мм с целью оптимизации ударного силового воздействия, обеспечивающего получение щебня требуемой прочности и кубовидной формы.

Изменение потребляемой мощности на тонну готового продукта представлено в табл. 1.

Таблица 1
Зависимость потребляемой мощности на тонну готового продукта от скорости удара

Скорость удара, м/с	Остаток на сите 20 мм, %	Потребляемая мощность на тонну готового продукта, кВт·ч		
		Дробилка	Вспомогательное оборудование	Общая
45	64	1,73	2,99	4,62
50	58	1,89	2,64	4,55
55	53	2,08	2,39	4,47
60	48	2,28	2,19	4,47
65	44	2,51	2,04	4,55
70	40	2,75	1,92	4,67
75	36	3,00	1,82	4,82
80	33	3,28	1,74	5,02

Примечание. Затраты электроэнергии на вспомогательное оборудование (питатель, грохот и транспортеры) составляют порядка 1 кВт·ч на тонну перерабатываемого материала.

Как следует из табл. 1, увеличение скорости вращения ротора с 45 до 80 м/с при дроблении доломитового щебня приводит к повышению удельного расхода энергии от 1,73 до 3,28 кВт·ч на тонну перерабатываемого материала. Анализируя величину остатка продукта на сите 20 мм, можно заключить, что оптимальная скорость дробления доломитового щебня находится в диапазоне 50–65 м/с, что соответствует расчетному значению при косом ударе. Чтобы сократить энергозатраты, было предложено установить отбойные элементы под углом 90° к траектории движения кусков материала.

Гранулометрический состав продуктов дробления доломитового щебня при различных скоростях удара приведен в табл. 2.

Таблица 2
Зависимость гранулометрического состава от скорости удара

Размер фракции продуктов отсева, мм	Выход фракций, %, при скорости удара, м/с		
	53	57	64
Крупнее 40	4,16	2,84	2,76
От 20 до 40	55,42	51,08	47,84
От 10 до 20	22,73	21,29	22,50
От 5 до 10	8,45	9,27	11,29
Менее 5	9,24	15,52	15,61

Для сравнения авторами была проведена оценка эффективности дробления доломита фракции 20–60 мм в конусной дробилке до готового продукта с размером менее 15 мм. Получено соотношение фракций 0–5 и 5–15 мм, которое составляет 30 % к 70 % в конусной дробилке, а в центробежно-ударной дробилке – 15 % к 85 % соответственно. Выход фракции доломитового щебня 5–15 мм в центробежно-ударной дробилке выше на 20 % и соответственно меньше образуется отсевов дробления (фракция менее 5 мм).

Кроме того, конусные дробилки обеспечивают получение щебня с содержанием зерен лещадной формы от 15 % и выше, а центробежно-ударные дробилки при аналогичных параметрах – до 10 %.

Проведены исследования физико-механических свойств щебня фракций 5–10 и 10–20 мм, полученных в щековой и ударно-центробежных дробилках. Установлено, что в результате ударно-центробежного дробления марка по дробимости повышается до 1000 в сравнении со щековой (600). Содержание в материале зерен пластинчатой и игловатой форм уменьшилось в среднем в 2–3 раза и составило 4,5–7,5 %, что соответствует щебню I группы по ГОСТ 8267–93. В измельченном продукте содержание частиц изометрической кубообразной формы составило около 93–95 %, а насыпная плотность щебня, полученного ударно-центробежным способом, повысилась на 5–8 %, что свидетельствует о его лучшем распределении в объеме за счет оптимального размера и формы зерен. Истираемость доломита в результате избирательно-

го дробления повысилась на 30–35 % и соответствует марке И-1 по ГОСТ 8267–93.

По данным интернет-источников, для ударно-центробежных дробилок производительностью 220 т/ч необходим двигатель мощностью 200–250 кВт, а для конусных дробилок аналогичного дробления при производительности 150 т/ч – электродвигатель мощностью порядка 315 кВт.

ВЫВОДЫ

1. На основе теоретического анализа и экспериментальных исследований установлена аналитическая зависимость (8) для определения необходимой скорости удара кусков дробимого материала об отбойное кольцо центробежно-ударной дробилки.

2. Предложено для уменьшения энергозатрат при дроблении каменного материала реализовать прямой удар кусков об отбойную поверхность, для чего внесены изменения в конструкцию дробилки.

3. Предложена аналитическая зависимость (9) для определения оптимальной силы удара кусков каменного материала об отбойную поверхность центробежно-ударной дробилки.

4. Экспериментально установлено, что центробежно-ударные дробилки по сравнению с конусными позволяют получить более качественный щебень ввиду малой лещадности (до 10 %)

и большего содержания требуемых кусков размером 5–15 мм, а по сравнению со щековыми дробилками достигается увеличение прочности зерен щебня с марки 600 до 1000.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Барон, Л. И.** Разрушение горных пород свободным ударом / Л. И. Барон, И. Е. Хмельковский. – М.: Наука, 1971. – 203 с.

2. **Создание** опытного образца роторно-ударной ДИМ для рудных и нерудных материалов производительностью до 10 т/ч: отчет о НИР / НИНКИ «Параметр» при ДГМИ; рук. темы И. П. Королев. – Алчевск, 1993. – 17 с. – ГР № 0193 У024515.

3. **Осколенко, Г. Н.** Исследование дробления и измельчения силикатных и других материалов в центробежной роторной мельнице-дробилке: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Г. Н. Осколенко. – Днепропетровск, 1965. – 27 с.

4. **Яблонский, А. А.** Курс теоретической механики / А. А. Яблонский, В. М. Никифорова. – М.: Лань, 2002. – 768 с.

5. **Багян, Э. Р.** Исследование и разработка способа механического дробления хрупких материалов свободным ударом с использованием центробежного ускорителя: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Э. Р. Багян; Ин-т геотехн. механики АН УССР. – Днепропетровск, 1986.

6. **Ложечников, Е. Б.** Обоснование и реализация многооперационного измельчения в проходной мельнице центробежного типа / Е. Б. Ложечников, А. К. Гавриленя // Вестник БИТУ. – 2007. – № 2. – С. 43–48.

Поступила 03.10.2012