

УДК 622.23.05

РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ МЕЛЬНИЦЫ ЦМВУ-800

Винокуров В.Р., Львов Е.С.

*ФБУ РАН «Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского» Сибирского отделения РАН,
Якутск, e-mail: vaviro@mail.ru*

Одной из основных характеристик дробильно-измельчительных аппаратов, наряду с гранулометрическим составом переработанного материала, является их удельная энергоёмкость. Однако удельная энергоёмкость не отражает полностью энергетическую эффективность данного дробильно-измельчительного оборудования. Нами проведена оценка энергетической эффективности ступенчатой центробежной мельницы. Методика оценки основана на сравнении энергии, затраченной на образование новой поверхности в результате измельчения с полезной выработанной электродвигателями электроэнергией, а также приобретенной перерабатываемым материалом кинетической энергии. Расчеты произведены на основе фактических экспериментальных данных. Однако удельная энергоёмкость не отражает полностью энергетическую эффективность данного дробильно-измельчительного оборудования. Так, помимо удельной энергоёмкости для сравнения эффективности работ дробильно-измельчительных аппаратов В.И. Ревнивцевым с соотр. введен коэффициент использования подведенной к материалу энергии (нетто коэффициент), характеризующий, какая часть энергии расходуется на собственно разрушение. Данный коэффициент зависит от способа дезинтеграции, а также конструктивных особенностей дробильно-измельчительного оборудования. Для измельчителя ЦМВУ-800 нетто коэффициент равен 0,27%. На современном уровне технологии дезинтеграции «нетто коэффициент» составляет в лучшем случае десятые доли процента, так как большая часть производимой в дробильно-измельчительном аппарате энергии диссипирует и не идет только на образование новой поверхности. Для сравнения – нетто коэффициент для серийной дробилки УКОРП-1 по данной методике составляет 0,31%.

Ключевые слова: центробежные измельчители, конструктивные особенности, эффективность измельчения, удельная поверхность, частицы, измельченный материал, рабочие органы

CALCULATION OF THE ENERGY EFFICIENCY CENTRIFUGAL MILL

Vinokurov V.R., Lvov E.S.

IGDS name of N.V. Chersky SB RAS, Yakutsk, e-mail: vaviro@mail.ru

One of the main characteristics of the crushing and grinding machines, along with the size distribution of recycled material, is its energy density. However, the energy density does not fully reflect the energy efficiency of the crushing and grinding equipment. We evaluated the energy efficiency of speed centrifugal mill. Methods of assessment based on a comparison of the energy used in the formation of a new surface by grinding with a useful electric power generated and purchased processed material kinetic energy. Calculations based on actual experimental data. However, the energy density does not reflect fully the energy efficiency of the crushing and grinding equipment. So, in addition to specific energy consumption to compare the effectiveness of work of crushing and grinding machines V.I. Revnitsyev et al. introduced utilization of energy supplied to the material («net rate»), which is characterized by some of the energy is spent on pure destruction. This ratio depends on the method of disintegration, and the design features of crushing and milling equipment. For chopper TSMVU-800 «net rate» is equal to 0.27%. At the current level of technology disintegration «net rate» is at best a few tenths of a percent, as most of the produced in the crushing and grinding unit of energy is dissipated and is not purely on the formation of the new surface. For comparison, a «net rate» for the serial crusher UKORP-1 by this method is 0.31%.

Keywords: centrifugal shredders, structural features, grinding efficiency, specific surface area, particle, particulate material, working bodies

Одной из основных характеристик дробильно-измельчительных аппаратов, наряду с гранулометрическим составом переработанного материала, является их удельная энергоёмкость. Однако удельная энергоёмкость не отражает полностью энергетическую эффективность данного дробильно-измельчительного оборудования. В данной работе приведена оценка энергетической эффективности ступенчатой центробежной мельницы.

Было произведено несколько попыток рассчитать, вычислить скорость движения разрушаемой частицы в трехступенчатой мельнице [1, 2].

В первоначальных расчетах кинематики движения частиц в лабораторном цен-

тробежном измельчителе встречного удара ЦМВУ основывается на алгебраическом сложении скоростей движущихся навстречу друг к другу физических тел. Измельчитель имеет такую конструкцию, в которой встречный удар центров масс двух частиц происходит на одной линии. С учетом геометрических размеров рабочих органов лабораторного измельчителя ЦМВУ и числа ступеней N частицы при отрыве от каждой ступени приобретают следующие нарастающие линейные скорости $V_{\text{внешн}}$, $V_{\text{внутр}}$:

$$V_{\text{внутр}} = 2\pi \cdot n \cdot R_{\text{внутр}};$$

$$V_{\text{внешн}} = 2\pi \cdot n \cdot R_{\text{внешн}};$$

где $n_{\text{внутр}}$ – частота вращения внутреннего диска; $n_{\text{внешн}}$ – частота вращения внешнего диска.

Суммарная скорость встречного удара в каждой ступени представляет собой алгебраическую сумму

$$V_{\text{удара}} = V_{\text{внутр}} + V_{\text{внешн}}$$

Нарастание линейной скорости отрыва измельченных частиц от ступеньки к ступеньке происходит в пропорции R1:R2:R3:::RN.

Таблица 1
Размеры рабочих органов измельчителя ЦМВУ и скорости частиц

Число ступеней N	$R_{\text{внутр}}, \text{ м}$	$V_{\text{внутр}}, \text{ м/с}$	$R_{\text{внешн}}, \text{ м}$	$V_{\text{внешн}}, \text{ м/с}$	$V_{\text{удара}}, \text{ м/с}$
1	0,1	80,6	0,11	23	103,6
2	0,13	104,5	0,14	29,3	133,8
3	0,16	128,6	0,17	35,5	164,1

или

$$v = \sqrt{\left(\frac{R_0}{2} \omega e^{\omega_{\text{вн}t_1}} - \frac{R_0}{2} \omega e^{-\omega_{\text{вн}t_1}} \right)^2 + \left(\omega_{\text{вн}} R_{\text{вн}1} + \omega_{\text{нар}} R_{\text{нар}1} \right)^2} \quad (2)$$

При лабораторных испытаниях ЦМВУ оптимальный режим работы лабораторного измельчителя достигнут при числе ступеней $N = 3$ и частоте вращения внутреннего диска 7700 об/мин, внешнего диска 2000 об/мин.

Оптимальный режим работы измельчителя при данных геометрических размерах рабочих органов подобран экспериментально по наибольшему выходу мелких классов измельченного материала (табл. 2).

Позже были произведены более точные расчеты скорости движения разрушаемой частицы на примере трехступенчатой мельницы ударного действия [3].

Расчет скорости движения частиц, достигаемой при динамическом контакте на уровне одной ступени, производился по формуле

$$v = \sqrt{v_{r \text{ вн}1}^2 + (v_{n \text{ вн}1}^2 + v_{n \text{ нар}1}^2)} \quad (1)$$

Таблица 2
Гранулометрический состав измельченного материала

Число ступеней	Выход продукта по классам, мм									
	+1		-1 + 0,5		-0,5 + 0,25		-0,25 + 0,1		-0,1	
	$m_1, \text{ г}$	$S_1, \text{ м}^2$	$m_2, \text{ г}$	$S_2, \text{ м}^2$	$m_3, \text{ г}$	$S_3, \text{ м}^2$	$m_4, \text{ г}$	$S_4, \text{ м}^2$	$m_5, \text{ г}$	$S_5, \text{ м}^2$
1	46,5	0,1	35	0,103	23,5	0,14	32,5	0,412	12,5	0,27
2	32,5	0,072	34	0,1	26	0,156	42	0,53	15,5	0,34
3	15	0,03	14	0,04	9	0,05	59	0,74	53	1,17

Таблица 3
Расчётные данные по скорости движения разрушаемых частиц в трехступенчатой центробежной лабораторной мельнице

Число ступеней N	$R_{\text{внутр}}, \text{ м}$	$R_{\text{внешн}}, \text{ м}$	Радиальная скорость, $v_{r \text{ вн}1}, \text{ м/с}$	Тангенциальные скорости		Расчетные данные $V_{\text{удара}}, \text{ м/с}$
				Внутреннего раб. органа $v_{\text{вн}1}, \text{ м/с}$	Наружного раб. органа $v_{\text{нар}1}, \text{ м/с}$	
1	0,05	0,06	26,13	26,18	12,56	46,7
2	0,07	0,08	25,65	36,65	16,75	59,2
3	0,09	0,1	29,62	47,12	20,94	74,2

В табл. 3 приведены расчётные данные по скорости движения разрушаемых частиц в трехступенчатой центробежной лабораторной мельнице.

Наращение линейных скоростей отрыва от ступени к ступени происходит в пропорции R1:R2:R3:RN. Сообщаемая рабочими органами кинетическая энергия, придаваемая загружаемому в мельницу материалу с массой M , без учета потерь массы равна

$$E_{\text{кин}} = M/2. \quad (3)$$

Рассмотрим энергетическую эффективность работы мельницы ЦМВУ-800 двумя способами; через скорости движения частиц V и потребляемой электрической энергии. На полевых испытаниях на месторождении Задержнинская (рисунок) была достигнута реальная стабильная производительность измельчения кварцевой руды 5,14 т/ч [3].



Общий вид промышленного образца центробежной мельницы ЦМВУ-800

Рабочие органы мельницы приводятся в действие двумя асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором с суммарной мощностью 7,0 кВт, КПД двигателей равна 0,85. Вырабатываемая полезная механическая энергия за 1 ч составляет

$$E_{\text{мех}} = 7,0 \cdot 0,85 = 5,95 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 5950 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ с} = 2,14 \cdot 10^7 \text{ Дж},$$

а рассчитанная по формуле (3) с учетом скоростей встречного удара приобретенная кинетическая энергия равна $2,29 \cdot 10^7$ Дж.

Удельная потребляемая электрическая энергоёмкость на тонну измельченного материала составляет

$$E_{\text{уд}} = \frac{7,0 \text{ кВт} \cdot \text{ч}}{5,14 \text{ т}} = 1,36 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т}}.$$

При переходе выработанной электродвигателями механической энергии только на разрушение площадь вновь образовавшейся поверхности при измельчении равна

$$S = \frac{E_{\text{мех}}}{w}, \quad (4)$$

где w – удельная поверхностная энергоёмкость, для кварца ≈ 1 Дж/м².

Удельная вновь образовавшаяся поверхность на массу измельченного материала равна

$$S_{\text{уд}} = \frac{S}{M}. \quad (5)$$

Подставляя (4) в (5), найдем значения для удельной вновь образовавшейся поверхности, с учетом скорости встречного удара:

$$S_{\text{уд}} = \frac{E_{\text{мех}}}{w \cdot M} = \frac{2,29 \cdot 10^7 \text{ Дж}}{1 \text{ Дж/м}^2 \cdot 5140 \text{ кг}} = 4,45 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{кг}$$

и потребляемой электроэнергии:

$$S_{\text{уд}} = \frac{E_{\text{мех}}}{w \cdot M} = \frac{2,14 \cdot 10^7 \text{ Дж}}{1 \text{ Дж/м}^2 \cdot 5140 \text{ кг}} = 4,16 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{кг}.$$

Найденные двумя способами удельные поверхности не разнятся сильно, что наводит на мысль о правомерности проведенных расчетов.

Фактическую удельную поверхность вновь образовавшейся при измельчении поверхности можно вычислить исходя из экспериментальных данных. Для простоты расчетов формы измельченных частиц примем за сферические, а за диаметр d_i возьмем средний размер класса. Тогда удельная поверхность при измельчении равна

$$S_{\text{уд.эксп}} = \frac{\sum_1^i S_i - S_{\text{исх}}}{M}, \quad (6)$$

где S_i – площадь поверхности всех n_i частиц в i классе, с диаметром d_i ; $S_{\text{исх}}$ – площадь частиц исходного материала до измельчения. Пренебрегая $S_{\text{исх}}$, так как, как правило, $S_{\text{исх}} \ll S_p$, тогда

$$S_{\text{уд.эксп}} = \frac{\sum_1^i S_i}{M} = \frac{\sum_1^i n_i \cdot \pi \cdot d_i^2}{M}. \quad (7)$$

Число частиц n_i в каждом i классе равно

$$n_i = \frac{6m_i}{\rho \cdot \pi \cdot d_i^3}, \quad (8)$$

где ρ – плотность кварца, равная 2700 кг/м³.

Подставляя (6) в (5), для удельной поверхности вновь образовавшихся частиц получим выражение

$$S_{\text{уд.эксп}} = \frac{\sum_1^i \frac{6m_i}{\rho \cdot d_i}}{M}, \text{ (м}^2/\text{кг)}. \quad (9)$$

Таблица 4

Грансостав продуктов измельчения кварцевой руды (исх. круп. –10 + 5 мм)

Классы крупности, мм	Средний диаметр d_p , мм	Выход продукта измельчения, %	Масса материала по классам m_p , кг	S_p , м ²
–0,05 + 0,0	0,025	2,65	136,1	12097
–0,05 + 0,1	0,075	10,06	517,08	15320,8
–0,2 + 0,1	0,15	22,24	1143,13	16935,25
–0,315 + 0,2	0,25	23,20	1192,48	10599,8
–0,63 + 0,315	0,47	28,71	1475,69	6977,25
–1 + 0,63	0,81	7,41	380,87	1045
–1,6 + 1	1,3	3,71	190,69	325,96
–2,5 + 1,6	2,05	1,48	76,07	82,46
–5 + 2,5	3,75	0,53	27,24	16,14

Расчеты по формуле (7) с использованием экспериментальных данных из табл. 2 дают значение для удельной поверхности 12,33 м²/кг.

Помимо удельной энергоемкости, для сравнения эффективности работ дробильно-измельчительных аппаратов В.И. Ревнивцевым [5] введен коэффициент использования подведенной к материалу энергии (нетто коэффициент), характеризующий, какая часть энергии расходуется на собственно разрушение

$$K = \frac{S_{\text{уд.эксп.}}}{S_{\text{уд.расч}}} \cdot 100\%. \quad (10)$$

Данный коэффициент зависит от способа дезинтеграции, а также конструктивных особенностей дробильно-измельчительного оборудования.

Для ЦМВУ-800 нетто коэффициент равен 0,24 %. На современном уровне технологии дезинтеграции нетто коэффициент составляет в лучшем случае десятые доли процента, так как большая часть производимой в дробильно-измельчительном аппарате энергии диссипирует и не идет на образование новой поверхности. Таким образом, центробежная мельница ЦМВУ-800 вполне составляет конкуренцию серийным дробильно-измельчительным аппаратам, с учетом простоты конструкции и удовлетворительной производительности и энергоемкости.

Список литературы

1. Матвеев А.И., Винокуров В.Р. Экспериментальные исследования дезинтеграции геоматериалов в измельчителе многократного динамического воздействия // Горный информ.-аналит. бюллетень. – 2007. – № 11. – С. 370–372.
2. Матвеев А.И., Винокуров В.Р. Разработка методики расчета рабочих параметров работы центробежных аппаратов измельчения многократного динамического воздействия // Наука и образование. – 2012. – № 1. – С. 32–35.
3. Винокуров В.Р. Испытания центробежных измельчителей с разной формой активаторов // Горн. информ.-аналит. бюллетень. – 2008. – отдельный выпуск 2. Якутия-1. – С. 193–196.
4. Винокуров В.Р., Осипов Д.А., Матвеев А.И. Исследовании половинчатого разрушения частиц на лабораторном центробежном стенде // Проблемы комплексного освоения георесурсов: сб. материалов Международной конференции. – Хабаровск.
5. Ревнивцев В.И., Гапонов В.Г., Загоратский Л.П. и др. Селективное разрушение минералов. – М.: Недра, 1988. – 129 с.

References

1. Matveev A.I., Vinokurov V.R. Jeksperimentalnye issledovaniya dezintegracii geomaterialov v izmelchitele mnogokratnogo dinamicheskogo vozdejstvija // Gornyj inform.-analit. byulleten. 2007. no. 11. pp. 370–372.
2. Matveev A.I., Vinokurov V.R., Osipov D.A. Issledovanie polovinchatogo razrusheniya chastic na laboratornom centrobezhnom stende // Mezhdunarodnaya kon-ferenciya «problemy kompleksnogo osvo-eniya georesursov» g. Habarovsk. 2008 pp. 33–35.
3. Vinokurov V.R. Ispytaniya centrobezhnyx izmelchitelej s raznoj formoj aktivatorov // Gorn. inform.-analit. byulleten. 2008. Otdelnyj vypusk 2. Yakutiya-1. pp. 193–196.
4. Vinokurov V.R., Osipov D.A., Matveev A.I. Issledovani polovinchatogo razrusheniya chastic na laboratornom centrobezhnom stende Sb. materialov Mezhdunarodnoj kon-ferencii «Problemy kompleksnogo osvoeniya georesursov» g. Habarovsk.
5. Revnivcev V.I., Gaponov V.G., Zagoratskij L.P. i dr. Selektivnoe razrushenie mineralov. M.: Nedra, 1988. 129 p.