

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОТРЕБНОЙ МОЩНОСТИ ЩЕКОВОЙ ДРОБИЛКИ ОТ СТЕПЕНИ ИЗНОСА ДРОБЯЩИХ ПЛИТ

Мишин И.И., Болобов В.И.

Санкт-Петербургский горный университет, г.Санкт-Петербург

Ключевые слова: щековая дробилка, мощность, степень износа.

Аннотация. Потребная мощность дробления – одна из определяющих характеристик дробилки. В статье рассмотрены способы определения потребной мощности, а также выявлена экспериментальная зависимость напряжения разрушения куска породы от радиуса скругления индентора. Авторами разработана математическая модель для определения мощности в зависимости от степени износа дробящих плит, которая может быть использована для прогнозирования потребной мощности дробления на протяжении срока службы дробящих плит.

ESTIMATION OF THE DEPENDENCE OF THE REQUIRED CRUSHING POWER OF A JAW CRUSHERS FROM THE WEAR STAGE OF CRUSHING PLATES

Mishin I.I., Bolobov V.I.

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: jaw crusher, power, wear stage.

Abstract. The required crushing power is one of the defining characteristics of the crusher. The article describes the methods for determining the required power, as well as the experimental dependence of the fracture stress of a piece of rock on the radius of rounding of the indenter. The authors developed a mathematical model to determine the power depending on the degree of wear of the crushing plates, which can be used to predict the required power of crushing over the life of the crushing plates.

Потребная мощность – одна из определяющих характеристик дробилки, влияющая на выбор электродвигателя. Поскольку процесс дробления, во многом, случайный, до настоящего времени не разработан общепринятый способ определения мощности, учитывающий различные факторы, в том числе, и влияние на потребную мощность степени износа дробящих плит дробилки.

К. Рундквистом [1] была предложена обобщающая формула (1), отражающая несколько гипотез дробления,

$$N = K \frac{i^{n-1} - 1}{D_{CB}^{n-1}} Q, \quad (1)$$

где n – показатель степени зависимости расхода энергии для дробления от начального D_{CB} до конечного d_{CB} размера дробимой породы; K – коэффициент,

характеризующий зависимость затрат энергии от вида породы;
 Q – производительность дробления, $\text{м}^3/\text{ч}$; i – степень дробления.

При подстановке различных показателей n в формулу (1), она преобразуется в выражения, соответствующие различным гипотезам по теории дробления [2].

При $n=2$ получается формула, соответствующая гипотезе Риттингера. Он предположил, что работа, затрачиваемая на дробление, пропорциональна площади обнаженной поверхности, появляющейся в дробимом материале. По этой гипотезе при дроблении твердых тел на первом месте стоят такие деформации, при которых материал разрушается по плоскостям раскола.

$$N_1 = K_1 \frac{i-1}{D_{CB}} Q. \quad (2)$$

При $n=1,5$ получается эмпирическая зависимость, соответствующая гипотезе Бонда, выведенная на основании анализа результатов периодического измельчения большого числа руд.

$$N_2 = K_2 \frac{\sqrt{i}-1}{\sqrt{D_{CB}}} Q. \quad (3)$$

При $n=1$ получается формула, соответствующая гипотезе Кирпичева-Кика, которая утверждает, что энергия деформации пропорциональна объему деформируемого тела. Она позволяет оценить предельное значение энергии упругой деформации, выше которого наступает переход в необратимую деформацию – разрушение.

$$N_3 = K_3 \lg i Q. \quad (4)$$

Предложенные выше гипотезы Риттингера, Кика-Кирпичева и Бонда, устанавливающие взаимосвязь затрат энергии и крупности при разрушении, содержат различные коэффициенты пропорциональности. По сути, эти гипотезы выведены для упрощенных схем разрушения, не учитывающих развитие трещин в напряженно-деформированном состоянии материала и другие физические явления при разрушении.

Б.В. Клушанцевым [3] на основании экспериментальных данных была разработана формула (5) для практических расчетов привода щековых дробилок.

$$N = 1,1 E_i K_M \frac{\sqrt{i}-1}{\sqrt{D_{CB}}} Q \gamma, \quad (5)$$

где E_i – энергия, затрачиваемая на дробление тонны породы при уменьшении крупности от максимальной до 1 мм, $\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{т}$; K_M – коэффициент масштабного фактора, характеризующий изменение E_i с изменением крупности материала; i – степень дробления; Q – производительность дробилки по питанию, $\text{м}^3/\text{ч}$; γ – насыпная масса породы, $\text{т}/\text{м}^3$.

Значение E_i , которое авторы рекомендуют принимать по специальным таблицам в зависимости от вида горной породы и месторождения, колеблется в довольно широких пределах. Например, для гранита Могилянського

месторождения $E_i = 4,56$ кВт·ч/т; для гранита Житомирского месторождения $E_i = 6,94$ кВт·ч/т; для диорита Клесовского месторождения $E_i = 8,51$ кВт·ч/т [3].

Формула, предложенная В.А. Олевским [4], основана на результатах испытаний дробилок

$$N = Pe \frac{n}{106 \cdot 60 \eta}, \quad (6)$$

где P – средняя величина усилия дробления, которое зависит от многих факторов (геометрия камеры дробления, свойства породы, степень заполненности дробилки, отношение эффективного усилия дробилки к максимальному усилию и т.д.), t ; e – расстояние, на котором приложена сила, зависящее от хода щеки дробилки, м; n – скорость вращения эксцентрикового вала, об/мин, η – механический КПД дробилки.

Эти теории и выражения при различных теоретических основах не учитывают при определении N изменение геометрии дробящих плит вследствие изнашивания. Хотя, как можно заключить, степень износа плит напрямую влияет на усилие дробления, т.к. площадь контакта плиты с породой и характер ее разрушения зависит от радиуса скругления рифления дробилки.

За основу разрабатываемой в данной статье модели расчета взята формула (6) В.А. Олевского, как основанная на исследовании работы щековой дробилки и включающая в себе такие важные параметры, как параметры рабочего пространства дробилки, частоту вращения вала и механические характеристики дробимой породы.

Вывод формулы расчета потребной мощности, учитывающей износ дробящих плит, производился на примере дробилки марки СМД-118, широко используемой на гранитных щебеночных карьерах, с параметрами: ширина приемного отверстия $B=1500$ мм, ширина выходной щели $b=155$ мм (среднее значение для дробилки этого типа), высота и длина камеры дробления $H=2700$ мм, $L=1500$ мм.

При представлении рабочего пространства дробилки в соответствии со схемой раскалывания по В.А. Бауману [4] (рисунок 1), в ней может одновременно уместиться пять кусков породы с радиусами $R_{к1}=113$ мм, $R_{к2}=164$ мм, $R_{к3}=238$ мм, $R_{к4}=345$ мм, $R_{к5}=500$ мм (максимальная допустимая крупность породы для дробилки СМД-118).

Основываясь на гипотезе Риттингера о пропорциональности работы разрушения вновь образуемой поверхности, предполагалось, что каждому из пяти кусков соответствует усилие разрушения, определяемое по формуле

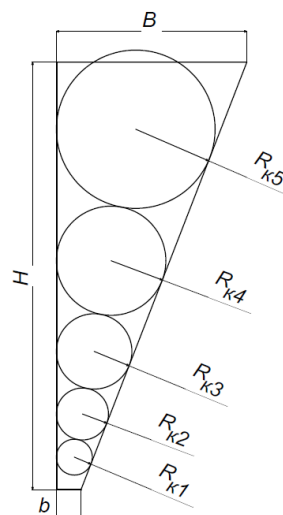


Рис. 1. Принятая схема размещения кусков в щековой дробилке в момент разрушения

$$P_i = 2R_{ki}Lq_i, \quad (7)$$

где L – длина камеры дробления, м; q_i – напряжение в куске, необходимое для разрушения породы, Па.

Влияние степени износа плит на разрушающее усилие предлагается учитывать, введя понятие "относительное разрушающее напряжение k_i "

$$k_i = q_i / \sigma_p, \quad (8)$$

где σ_p предел прочности породы при одноосном растяжении, Па.

При этом величина k_i есть функция от степени износа, за которую принимали отношение радиуса рифления дробящей плиты R_p к радиусу разрушаемого куска породы R_k , определяемая экспериментально.

В предположении, что равнодействующая усилий дробления приложена к подвижной щеке в точке, соответствующей середине камеры дробления по высоте [4], а суммарное усилие дробления в соответствии со схемой рисунка 1 равно

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5, \quad (9)$$

потребную мощность можно представить в виде выражения, составленного на основе зависимости (6).

$$N\left(\frac{R_p}{R_k}\right) = m \frac{f_0 s \beta \vartheta n}{60 \eta} \sum_{i=1}^5 2R_{ki} L k_i \sigma_p, \quad (10)$$

где f_0 – коэффициент заполненности дробилки (принять равным 0,25); β – коэффициент, характеризующий отношение эффективного усилия дробилки к максимальному усилию, для дробилок с простым движением щеки принимается равным 0,2; ϑ – коэффициент, учитывающий энергию, передаваемую маховиком в течение одного оборота, принимается равным 0,5; η – механический КПД, учитывающий потери в приводном и передаточном механизме (для щековых дробилок можно принять равным 0,75) [4, 5]; s – ход щеки, для дробилки СМД-118 примем равным 40 мм.

Данная модель необходима для определения эффекта увеличения износостойкости плит на потребляемую мощность с течением времени.

Зависимость $k_i = f\left(\frac{R_p}{R_k}\right)$ определяли экспериментально. В качестве

разрушаемой породы использовали керны (радиусом $R_k=28$ мм, длиной $L=50$ мм) гранита Выборгского гранитного массива (30-35% кварц, 25-30% плагиоклаз, 30-35% калиевый полевой шпат, 5-10% биотит (рисунок 2) с пределом прочности на сжатие $\sigma_{сж} \sim 200$ МПа.

Исходя из заключения, что разрушение породы в щековой дробилке происходит преимущественно раскалыванием в результате сжатия, экспериментальные исследования проводились при испытании фрагмента породы на одноосное сжатие с использованием универсальной испытательной машины Zwick, снабженной специально разработанной оснасткой (рисунок 3), оснащенной инденторами с различным радиусом скругления.



Рис. 2. Вид зерен кварца (светлый) и плагиоклаза (серый) в структуре гранитных фрагментов

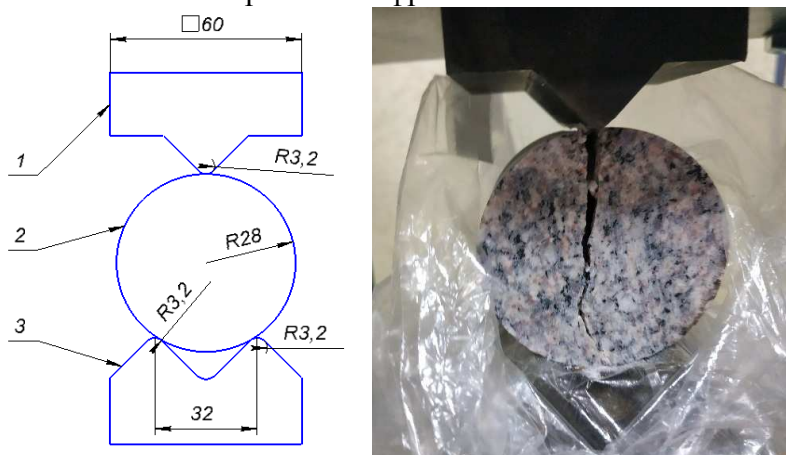


Рис. 3. Оснастка экспериментального стенда по изучению влияния радиуса скругления индентора на усилие и энергоемкость процесса разрушения гранита: 1- индентор, 2- фрагмент породы, 3- вставка

Инденторы, вида поз. 1 рисунка 3, изготавливались из стали 45 и имели радиусы скругления $R_p = 3,2; 6; 8; 10; 12$ мм, необходимые для обеспечения получения соотношений R_p / R_k , имеющих место в дробилке (рисунок 1) между радиусом рифления и куском разрушаемой породы.

Целью экспериментов являлось получение семейства кривых "усилие сжатия P " - "глубина внедрения ϵ " с фиксацией усилия P_k , соответствующего разрушению фрагмента.

Вид полученных кривых представлен на рисунке 4.

Установленные усилия разрушения гранита, как функции от относительного радиуса скругления индентора (отношение радиуса скругления к радиусу куска) представлены в таблице. Там же и на рисунке 5

приведены значения относительного напряжения разрушения $k_i = q/\sigma_p$, полученные после подстановки величин P_k , σ_p в (7), (8) (для испытуемого гранита принимали $\sigma_p = 10$ МПа).

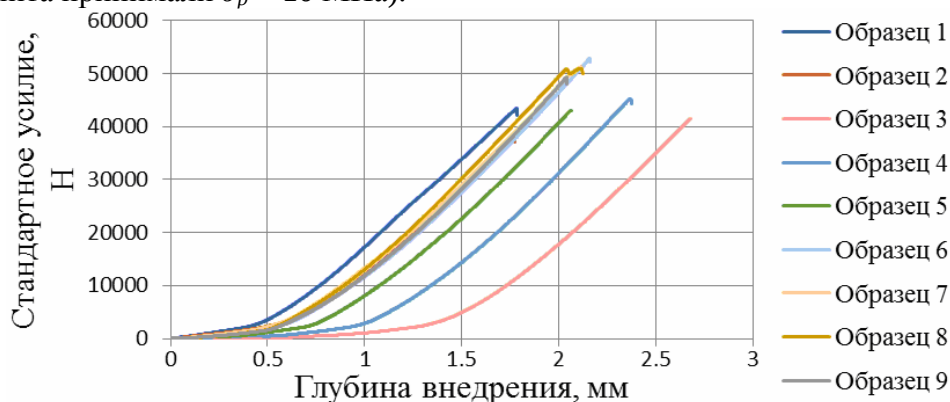


Рис. 4. Кривые зависимостей усилия от глубины внедрения, полученные в результате эксперимента

Табл. 1. Экспериментально установленные параметры разрушения фрагментов гранита

№ образца	Радиус скругления R_p , мм	R_p/R_k	P_k , Н	$k_i = q/\sigma_p$
1	3,2	0,114	43502	1,942
2	3,2	0,114	37730	1,684
3	6	0,214	41478	1,852
4	8	0,286	45163	2,016
5	8	0,286	43079	1,923
6	10	0,357	52829	2,358
7	10	0,357	51260	2,288
8	12	0,429	50899	2,272
9	12	0,429	49341	2,203

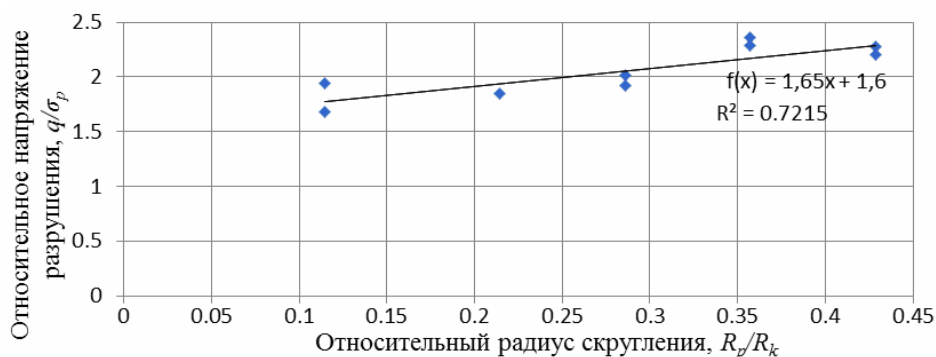


Рис. 5. Зависимость относительного напряжения разрушения q/σ_p от относительного радиуса скругления R_p/R_k

Как следует из вида полученных зависимостей, с увеличением радиуса скругления (относительного радиуса скругления) индентора усилие P_k ,

потребное для разрушения, как и величина относительного напряжения разрушения k_i возрастают.

В предположении, что зависимость $q/\sigma_p = f(R_p/R_k)$, установленная в условиях эксперимента (рисунок 5), справедлива и для условий работы дробилки, значение q , как функции от радиуса рифления брони, подставляли в выражение (10), которое решали в программе PTC Mathcad. При этом зависимость увеличения радиуса рифления R_p во времени t из-за износа дробящих плит выражали функцией (11)

$$R_p(t) = R_{p0} + (R_{p\max} - R_{p0}) \cdot \frac{t}{t_{\max}}, \quad (11)$$

где R_{p0} – исходный радиус рифления (для дробилки СМД-118 3 мм), $R_{p\max}$ – конечный радиус рифления (150 мм), $t_{\max}$ – нормативный срок службы дробящих плит (1250 часов).

Полученная расчетная временная зависимость изменения мощности дробилки СМД-118, потребной для разрушения гранита с $\sigma_{сж} \sim 200$ МПа, учитывающая изнашивание дробящих плит, представлена на рисунке 6.

Как следует из результатов расчетов (рисунок 6), из-за изнашивания рифлений дробящих плит потребная мощность дробилки СМД-118 за нормативный срок службы плит возрастает в 1,33 раза.

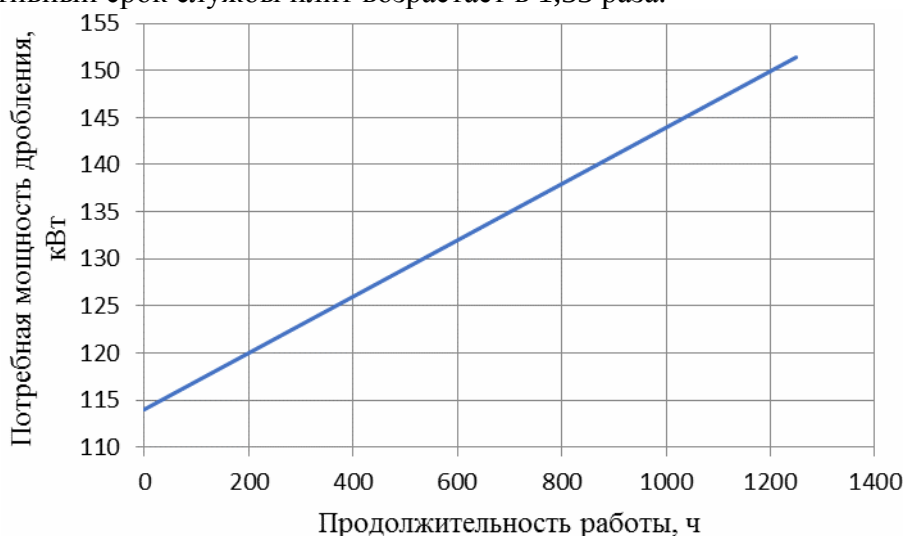


Рис. 6. Зависимость потребной мощности от времени работы щековой дробилки СМД-118

Табл. 2. Расчетные значения потребной мощности дробления для дробилки СМД-118

Метод расчета	Расчетная потребная мощность, кВт
По предложенной модели	132,5
По формуле Олевского[4]	144,4
По формуле Левенсона [4]	158,2
По формуле Механобра[6]	165,2

Для определения адекватности предлагаемой модели было произведено сравнение полученного среднего (за весь срок службы) значения потребной мощности со значениями N , рассчитанными по существующим методам расчета (таблица 2).

Из таблицы 2 видно, что потребная мощность, рассчитываемая по предложенной модели, отличается от среднего значения потребной мощности (156 кВт), рассчитанного по трем основным методикам расчета дробилок, на 15%, что вполне достаточно для проведения инженерных расчетов.

Список литературы

1. Рундквист А.К. Общая формула законов дробления // Научно-технический информационный бюллетень института МеханОбр. 1956. №2. С. 11-16.
2. Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Логак Л.Н., Богацкий А.И. Щековые дробилки. Методы расчета и особенности эксплуатации. Обзор. – М.: ЦНИИТЭстройдормаш, 1972. – 87 с.
3. Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
4. Олевский В.А. Конструкции, расчеты и эксплуатация дробилок. – М.: Metallurgizdat, 1958. – 459 с.
5. Расчет щековых дробилок: Методические указания / Сост. Федотенко Ю.А., Коротких П.В. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2012. – 20 с.
6. Андреев Е.Е., Тихонов О.Н. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению: Учебник. – СПб: Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет), 2007. – 439 с.
7. M. Lindqvist, C.M. Evertsson. Liner wear in jaw crushers // Minerals Engineering. 2003. Volume 16, Issue 1. P. 1-12.

References

1. Rundquist A.K. General formula of the laws of crushing // Scientific-technical Bulletin of the Institute MechanObr. 1956. No. 2. P. 11-16.
2. Klushantsev B.V., Kosarev, A.I., Logic L.N., Bogatsky A.I. Jaw crusher. Methods of calculation and features of operation. Review. – M.: CNIITEstroydormash, 1972. – 87 p.
3. Klushantsev B.V., Kosarev A.I., Muizemnek Yu.A. Crushers. Design, calculation, features of operation. – Moscow: Mechanical Engineering, 1990. – 320 p.
4. Olevsky V.A. Designs, calculations and operation of crushers. – M.: Metallurgizdat, 1958. – 459p.
5. Calculation of jaw crushers: Guidelines / Comp. Fedotenko Yu.A., Korotkikh P.V. – Omsk: Publishing house SibADI, 2012. – 20 p.
6. Andreev E.E., Tikhonov O.N. Crushing, grinding and preparation of raw materials for enrichment: Textbook. – St. Petersburg: St. Petersburg state mining Institute (technical university), 2007. – 439 p.
7. M. Lindqvist, C.M. Evertsson. Liner wear in jaw crushers // Minerals Engineering. 2003. Volume 16, Issue 1. P. 1-12.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Мишин Илья Игоревич – аспирант кафедры машиностроения, mishin-i-i@yandex.ru.	Mishin Ilya Igorevich – PhD student, mishin-i-i@yandex.ru
Болобов Виктор Иванович – д.т.н., профессор кафедры машиностроения, boloboff@mail.ru	Bolobov Viktor Ivanovich – doctor of technical sciences, professor, boloboff@mail.ru
Санкт-Петербургский горный университет», г.Санкт-Петербург, Россия	Saint-Petersburg mining university, Saint-Petersburg, Russia

Получена 28.06.2019