



Оригинальная статья

УДК 621.926.3

DOI 10.17073/0368-0797-2022-10-733-739

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2417>



ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ КОНУСНОЙ ДРОБИЛКИ С УПОРАМИ

Д. Ф. Сахаров, А. В. Витушкин

■ Кузбасский институт ФСИН России (Россия, 654066, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, пр. Октябрьский, 49)

Аннотация. Одним из основных в металлургической, строительной и горной отраслях промышленности является процесс измельчения различных материалов как первичная подготовка сырья. На дробление материалов для получения необходимой фракции ежегодно расходуется до 4 % мирового производства электроэнергии, а для отдельно взятой шахты доля энергозатрат на дробление может достигать 50 % от годового объема. Часть электроэнергии тратится на создание запаса мощности дробильной машины (далее – дробилки) в связи с тем, что в настоящее время нет методик теоретического расчета мощности ее электропривода и определения затрат энергии на разрушение горных пород. Сырье, добытое на разных месторождениях, обладает различными физико-механическими свойствами, что оказывает существенное влияние на процесс измельчения. Различия в мощности электроприводов дробильных машин обусловлено разностью их типоразмеров, а география их применения учитывается созданием запаса мощности. Вышеприведенные факторы негативно сказываются на операционных расходах предприятий металлургической промышленности. В работе рассмотрены некоторые конструкции дробилок, в которых разрушение дробимого куска происходит в результате возникновения сложного напряженного состояния. Предложена новая конструкция конусной дробилки с упорами, позволяющая снизить затраты энергии на дробление материалов. Благодаря наличию упоров и простой кинематике движения рабочего органа достигается снижение сил, необходимых для разрушения кусков хрупких материалов в независимости от их свойств. При этом в дробимых кусках, разрушаемых в конусной дробилке с упорами, возможно создание сдвигового напряженного состояния, при котором теоретически достигается снижение силы, необходимой для дробления хрупких материалов в два раза в сравнении с дробилками сжатия. Описаны условия возникновения сдвигового напряженного состояния в дробимых кусках при их дроблении в конусной дробилке с упорами. Представлены рекомендации по созданию этих условий.

Ключевые слова: металлургическая промышленность, конусная дробилка, упор, дробление, энергоэффективность, сдвиговое напряженное состояние, касательные напряжения, энергозатраты при дроблении, сдвиг

Для цитирования: Сахаров Д.Ф., Витушкин А.В. Энергоэффективность конусной дробилки с упорами // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 10. С. 733–739. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-10-733-739>

Original article

ENERGY EFFICIENCY OF A CONE CRUSHER WITH STOPS

D. F. Sakharov, A. V. Vitushkin

■ Kuzbass Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia (49 Oktyabr'skii Ave., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654066, Russian Federation)

Abstract. Metallurgical, construction and mining industries are based on the process of grinding various materials. The main method of primary preparation of raw materials is crushing of the extracted ore. Up to 4 % of the world's electricity production is spent annually on crushing rocks to obtain the necessary fraction of material, and for a single mine, the share of energy consumption for crushing can reach 50 % of the annual volume. In addition to spending electricity directly on rocks destruction, some of it is spent on creating a power reserve for a crushing machine (hereinafter referred to as a crusher) due to the fact that currently there is no single method of theoretical calculation of the power of its electric drive, no single method of determining energy costs for rocks destruction. It is known that raw materials extracted from different deposits have different physical and mechanical properties, which has a significant impact on the grinding process. However, difference in power of electric drive of crushing machines is due to the difference in their standard sizes, and the geography of their application is taken into account by the creation of the above-mentioned power reserve. The above factors have a negative impact on the operating costs of metallurgical industry enterprises. The article discusses some designs of crushers in which the destruction of the crushed piece occurs as a result of complex stress state. New design of a cone crusher with stops is proposed, which allows reducing energy costs for crushing materials. Due to the presence of stops and simple kinematics of the working body movement, reduction in the power necessary for the destruction of pieces of brittle materials, regardless of their properties, is achieved. At the same time, in crushed pieces destroyed in a cone crusher with stops, it is possible to create a shear stress state, in which theoretically a reduction in power required for crushing brittle materials is achieved by 2 times in comparison with compression crushers.

The conditions of occurrence of shear stress state in crushed pieces during their crushing in a cone crusher with stops are described. The authors give recommendations for the reconstruction of these conditions.

Keywords: metallurgical industry, cone crusher, thrust, crushing, energy efficiency, shear stress state, tangential stresses, energy consumption for crushing, shear

For citation: Sakharov D.F., Vitushkin A.V. Energy efficiency of a cone crusher with stops. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 10, pp. 733–739. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-10-733-739>

ВВЕДЕНИЕ

Наибольшие затраты электроэнергии в металлургической промышленности приходятся на разрушение горных пород для получения материала необходимой фракции [1 – 7]. Для измельчения материалов используют дробилки.

От физико-механических свойств дробимого материала в значительной мере зависят силовые параметры процесса дробления [8, 9] и потребляемая мощность привода дробилки. Однако, как правило, заводами-изготовителями дробильного оборудования предлагается определенная мощность привода в зависимости от типоразмера оборудования, заложенная с учетом некоторого запаса, но без учета свойств дробимого материала. Этот факт (в некоторых случаях) приводит к неэффективному использованию дробилок и перерасходу энергии, затрачиваемой на дробление. Немаловажное влияние на энергозатраты при дроблении оказывают случайные обстоятельства (расположение лещадных кусков в камере дробления относительно друг друга и рабочего органа дробилки, присутствие недробимых материалов и др.).

Для теоретического расчета затрат энергии на разрушение дробимого куска используют различные теории прочности (разрушения) материалов, однако ни одна из них не позволяет рассчитать эти затраты с достаточной точностью, поскольку даже в границах одного месторождения свойства перерабатываемого материала могут варьироваться.

Большинство дробимых материалов являются анизотропными, то есть их свойства зависят от направления, в котором они изучаются, и имеют лещадную и иголоватую форму зерен. Такие материалы разрушаются по направлениям (плоскостям), ориентированным вдоль волокон (зерен). По мнению авторов работы [10] наиболее правильным должен быть подбор дробилки под определенное месторождение с учетом физико-механических характеристик материала и определения мощности привода на основании практических данных. Это позволит оптимизировать процесс дробления и повысить экономический эффект за счет снижения операционных расходов.

При исследовании вопросов прочности существенное значение имеет вид напряженного состояния. Большинство материалов по-разному разрушается в зависимости от того, являются ли напряжения растягивающими или сжимающими. Как показывает практика,

все материалы без исключения способны воспринимать весьма большие напряжения в условиях всестороннего сжатия, в то время как при одноосном растяжении их разрушение наступает при сравнительно низких напряжениях. Из теории сложного напряженно-деформированного состояния известно, что в случае, когда в теле действуют нормальные и касательные напряжения, разрушение тела происходит при более низких напряжениях, в отличие от случая разрушения под действием только нормальных напряжений.

Одним из способов разрушения материала в дробилке в результате возникновения в нем сложного напряженного состояния, когда на него действуют и сжимающие силы, и крутящий момент, является разрушение материалов в одновалковой дробильной машине с упором на валке. Такая дробилка представляет собой корпус, в котором установлены приводной валок с упором и неподвижная щека. Дробимый материал подают в зазор между вращающимся валком и неподвижной щекой [11]. Проведенный силовой анализ процесса разрушения куска в одновалковой дробилке и серия экспериментов доказывают факт возникновения сложного напряженного состояния в дробимом куске [12].

Разрушение различных хрупких материалов в щековой дробилке происходит за счет создания в дробимых кусках сложного напряженного состояния, обусловленного совместным действием сжимающих сил и крутящего момента [13]. Щековая дробилка представляет собой корпус, в котором установлены подвижная и неподвижная плиты (щеки). Дробимый материал подается в зазор между плитами и за счет движения одной из них осуществляется процесс дробления. В отличие от конструкций с простым и сложным движением подвижной щеки рабочий орган рассматриваемой дробилки движется поступательно, при этом горизонтальная составляющая рабочего хода генерирует в дробимом куске напряжения сжатия, а вертикальная составляющая – напряжения сдвига. Эти особенности кинематики позволяют создавать в дробимом куске сложное напряженное состояние с одновременным действием нормальных и касательных напряжений.

В настоящей работе осуществляется поиск конструкторских решений, которые бы позволили снизить затраты энергии на процесс дробления материалов, используемых в металлургическом и других производствах. С этой целью осуществляется поиск необходимых условий, при которых на дробимый материал будут

действовать не только сжимающие силы, но и другие нагрузки.

Цель настоящей работы – разработка способа дробления хрупких материалов путем создания в дробимых кусках сдвигового напряженного состояния, проведение анализа процесса дробления в конусной дробилке с упорами для выявления условий, при которых в дробимых кусках создается сдвиговое напряженное состояние.

НОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ НА ОСНОВЕ КОНУСНОЙ ДРОБИЛКИ

Типичными для крупного и среднего дроблений являются конусные дробилки. Первые модели конусных дробилок были разработаны в середине 1920-х годов, их конструкции претерпели значительные улучшения. Некоторые исследователи предложили серию эмпирических моделей дробилок на основе экспериментального наблюдения [14 – 16]. Однако до настоящего времени инженеры не смогли адаптировать эти модели при разработке модифицированной конструкции камеры дробления для улучшения эксплуатационных характеристик этих машин. Предложенные эмпирические модели не позволяют инженеру-конструктору исследовать влияние камеры дробления, параметров хода конусов и скорости его вращения на эффективность и производительность конусной дробилки [17].

Конусными принято называть дробилки, дробление в которых осуществляется сжатием материала между конусами, расположенными один внутри другого [18]. Конусные дробилки исторически считаются дробилками сжатия. Однако проведенный силовой анализ работы конусной дробилки показал, что при определенных условиях в процессе дробления на материал помимо сжимающих сил действует и крутящий момент, в результате чего в дробимом куске возникает сложное напряженное состояние, обусловленное совместным действием в куске нормальных и касательных напряжений [19].

Из теории сопротивления материалов известно, что деформация сдвига (как вид нагружения) встречается редко, чаще всего сопровождается изгибающими моментами. В случаях, когда расстояние между сосредоточенными силами достаточно мало, величиной изгибающего момента пренебрегают. В настоящей работе предлагается способ дробления материала, при котором на кусок действуют силы, расположенные в параллельных плоскостях на очень малом расстоянии друг от друга и направленные в противоположные стороны, то есть кусок подвергается деформации сдвига.

Для реализации рассматриваемого способа предлагается конструкция (рис. 1), схожая с конструкцией конусной дробилки крупного дробления, а также роторной дробильной машины [20]. Предлагаемая конструкция состоит из двух конусов: внутреннего подвижно-

го 1 и внешнего неподвижного 2. Внутренний конус осуществляет вращательное движение относительно своей вертикальной оси 5 посредством электропривода и, в отличие от внутреннего конуса классической конусной дробилки, качательного движения не совершает. На его поверхности установлены упоры 3, которые в такой конструкции выполнены в виде гребней в поперечном сечении, расположенные по всей длине конуса 1, а их рабочая поверхность направлена в сторону вращения. Внешний конус дробилки неподвижен и является ее корпусом. На поверхности неподвижного конуса также имеются упоры 4. Профили упоров 3 и 4 конструктивно могут иметь различные очертания. Упоры 3 расположены по всей поверхности конуса 1 с некоторым интервалом, при этом их высота изменяется на протяжении от загрузочного отверстия, расположенного в верхней части камеры дробления, до выходной щели. Аналогично выполняется расположение упоров 4 на поверхности неподвижного внешнего конуса 2. Между упором 3 подвижного конуса и упором 4 неподвижного конуса имеется технологический зазор, определяемый экспериментально в зависимости от условий процесса дробления (например, влажности

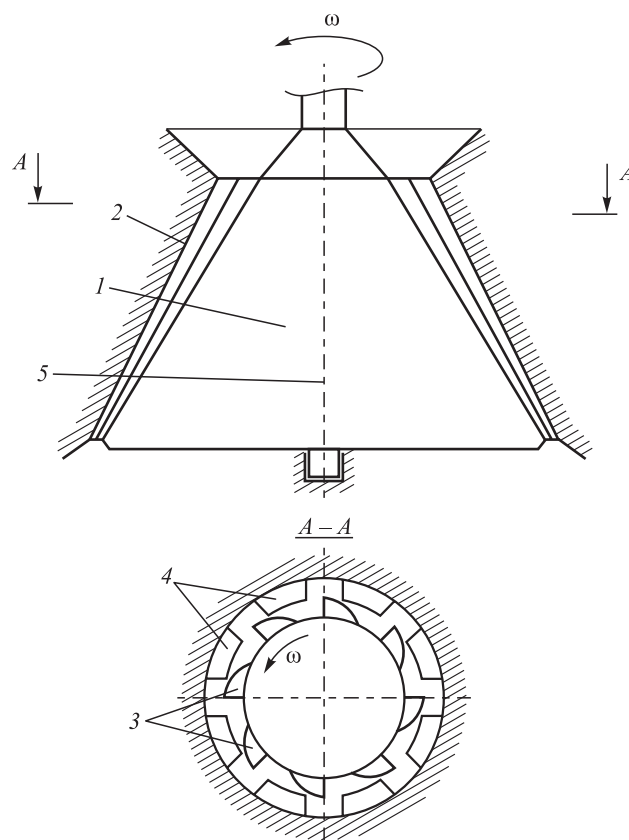


Рис. 1. Конусная дробилка с упорами:
 1 и 2 – подвижный и неподвижный конусы; 3 и 4 – упоры на подвижном и неподвижном конусе; 5 – ось дробилки

Fig. 1. Cone crusher with stops:
 1 and 2 – movable and fixed cone; 3 and 4 – stop on movable and on fixed cone; 5 – crusher axle

исходного сырья). Камера дробления рассматриваемой дробилки образована свободной поверхностью подвижного конуса и свободной поверхностью неподвижного конуса. Высота упора 3 камеры дробления (загрузочное отверстие) и упора 4, а также ширина зазора между ними суммарно должны быть больше максимального размера дробимого куска.

Дробление отдельного куска хрупкого материала в дробилках происходит вне зависимости от нахождения в камере дробления других кусков. Дробимый кусок подается в камеру дробления и под действием силы тяжести движется по ней до момента опирания куска о стенки камеры. Упор 3, расположенный на конусе 1, при его вращении вступает в контакт с куском, и из-за того, что находящаяся в камере дробления часть куска не может двигаться вместе с подвижным конусом из-за упоров 4, расположенных на поверхности неподвижного конуса 2, происходит разрушение дробимого куска. Разрушенный материал под действием силы тяжести перемещается по камере дробления до тех пор, пока не займет новое положение, соответствующее своему размеру, или не достигнет выходной щели. При необходимости процесс разрушения может повторяться неоднократно.

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ВОЗНИКАЮЩЕЕ В ДРОБИМОМ КУСКЕ В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ КОНУСНОЙ ДРОБИЛКИ С УПОРАМИ

При решении задачи аппроксимации дробимых кусков для проведения расчета напряженно-деформированного состояния упругих тел довольно эффективно применяется метод фиктивных канонических областей (ФКО), описанный в работах Л.Н. Ясницкого и С.Л. Гладкого. Вне зависимости от истинной формы кусок может быть представлен в виде тела, наиболее приближенного к шару. В работе [21] показано, что форма куска не влияет на величину и направление сил при дроблении. При определении напряженного состояния в дробимом куске его форму принимаем сферической.

В процессе дробления кусок находится в контакте с упорами конусов по линиям, результирующие силы N_A и N_B со стороны упоров направлены по касательным к траектории движения точек A и B навстречу друг другу (рис. 2, в плоскости точки A и B , где N_A , N_B , N_C и N_D – результирующие силы в точках A , B , C и D дробимого куска; N_A^B и N_B^B – вертикальные составляющие результирующих сил N_A и N_B ; N_A^r и N_B^r – горизонтальные составляющие результирующих сил N_A и N_B ; ω – угловая скорость; h – плечо пары сил). Проекция этих сил на вертикальную ось N_A^B и N_B^B расположены в параллельных плоскостях на очень малом расстоянии друг от друга и направлены в противоположные стороны. Проекция сил на горизонтальную ось N_A^r и N_B^r

будут значительно меньше вертикальных составляющих, а значит ими можно пренебречь. Из-за малого расстояния h между вертикальными составляющими N_A^B и N_B^B возникающий момент также не окажет заметного влияния на картину нагружения. В рассматриваемом случае крутящим моментом, стремящимся развернуть дробимый кусок, можно пренебречь. Нормальные силы N_C и N_D , действующие на дробимый кусок со стороны свободных поверхностей конусов, вызванные его опиранием на них под действием силы тяжести куска, многократно меньше сил, возникающих в процессе дробления, и в расчетах не учитываются. Разрушение куска происходит в результате действия вертикальных составляющих N_A^B и N_B^B , при этом в дробимом куске создается сдвиговое напряженное состояние с превалирующим действием касательных напряжений.

СРАВНЕНИЕ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ДРОБЛЕНИЯ В КОНУСНОЙ ДРОБИЛКЕ С УПОРАМИ И В ДРОБИЛКАХ СЖАТИЯ

К дробилкам сжатия можно отнести двухвалковую дробилку и щековые дробилки. В двухвалковой дробилке разрушение дробимых кусков происходит в результате взаимодействия куска и рабочих органов (валков), а в щековых дробилках материал, попадая в камеру дробления, разрушается в результате взаимодействия куска с другими кусками и с рабочими органами (щеками). В таком случае разрушение кусков материала в двухвалковой дробилке происходит за счет одноосного сжатия. Процесс разрушения куска в камере дробления щековой дробилки более сложный, поскольку на кусок помимо сжимающих сил со стороны щек дополнительно действуют другие куски. Как известно, материал, испытывающий всестороннее сжатие, может выдерживать большие напряжения, чем при одноосном сжатии, от чего энергозатраты на процесс дробления значительно возрастают.

При одноосном сжатии экспериментальных образцов правильной формы (сферической, кубической) из цементно-песчаной смеси на гидравлическом прессе их разрушение происходит внезапно, с предшествующим образованием наклонных трещин, направленных примерно под углом 45° к оси образца. Такой характер разрушения объясняется действием касательных напряжений, возникающих в наклонных площадках при сжатии. В ходе разрушения образец принимает форму, схожую с формой песочных часов, и окончательно образует две половины (два конуса). При этом оставшиеся части куска осыпаются, образуя мелкодисперсную пыль и куски маленькой фракции. Таким образом, материал переизмельчается. Аналогичные процессы происходят при работе дробилок сжатия.

Разрушение куска из цементно-песчаной смеси в конусной дробилке с упорами должно происходить вдоль

плоскости, проходящей через точки контакта куска с упорами дробилки (рис. 2, точки A и B), что исключает переизмельчение материала и приводит к повышению качества готовой продукции. В отличие от щековой дробилки существенное снижение количества переизмельченного материала обеспечивается за счет снижения межкускового взаимодействия внутри камеры дробления.

Важным является сравнение предельных напряжений хрупких материалов.

Напряжения, возникающие в разрушаемом куске при срезе (сдвиге) и сжатии, определяются по формулам

$$\sigma_{сж} = \frac{F}{A_{сеч}} \text{ и } \tau_{сж} = \frac{F}{A_{ср}},$$

где $\sigma_{сж}$ и $\tau_{ср}$ – расчетное напряжение, возникающее при сжатии и срезе; F – сила, действующая на кусок; $A_{сеч}$ и $A_{ср}$ – площадь поперечного сечения и среза куска.

Ранее было принято, что кусок имеет правильную (сферическую) форму, а сила F для каждого случая своя: $A_{сеч} = A_{ср} = A$. Следовательно, $\sigma_{сж} = \frac{F_{сж}}{A}$, $\tau_{сж} = \frac{F_{ср}}{A}$. Выразив из этих выражений площадь, получим

$$A = \frac{F_{ср}}{\tau_{ср}} = \frac{F_{сж}}{\sigma_{сж}}.$$

Преобразуем выражение для определения соотношения сил, возникающих при срезе (сдвиге) и сжатии:

$$F_{ср} = \frac{\tau_{ср}}{\sigma_{сж}} F_{сж}.$$

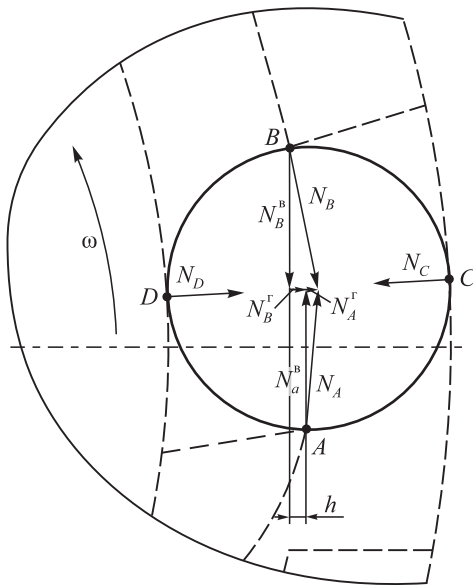


Рис. 2. Проекция сил, действующих на дробимый кусок в горизонтальной плоскости, на вертикальную и горизонтальную оси

Fig. 2. Projections of forces acting on the crushed piece in horizontal plane on vertical and horizontal axes

Для изотропных материалов максимальное значение отношения напряжений при срезе и сжатии [22]

$$\frac{\tau_{ср}}{\sigma_{сж}} = 0,5, \text{ тогда } F_{ср} = 0,5F_{сж}.$$

Для анизотропных материалов значение $\frac{\tau_{ср}}{\sigma_{сж}}$ может

варьироваться в широких пределах и зависит от ряда случайных факторов, например таких, как природа их происхождения, ориентация в камере дробления по отношению к рабочим органам дробилки и др. (см. таблицу).

При прочих равных условиях расчетное напряжение, возникающее в дробимом куске хрупкого изотропного материала, при его разрушении в дробилке сжатия в два раза больше расчетного напряжения при дроблении в конусной дробилке с упорами. Следовательно, энергоэффективность конусной дробилки с упорами

Пределы прочности известняковых пород различных месторождений

Average value of ultimate strength of limestone rocks of different deposits

Месторождение	Предел проч-ности, МПа		$\frac{\tau_{ср}}{\sigma_{сж}}$
	$\sigma_{сж}$	$\tau_{ср}$	
Молдавия			
Фаурештское	3,70	1,31	0,35
Папауцкое	2,86	1,33	0,46
Бранештское	4,40	1,70	0,40
Яловенское	4,08	1,57	0,33
Криковское	3,52	1,17	0,33
Гриндештское	2,33	1,06	0,44
Мало-Милештское	7,82	1,78	0,24
Бычковское	3,50	1,54	0,44
Григориопольское	5,32	1,84	0,35
Пашканское	3,90	1,84	0,47
Гординештское	12,90	2,97	0,23
Кетрошинское	11,62	1,93	0,17
Среднее	5,49	1,67	0,35
Азербайджан			
Шувелинское	1,30	0,97	0,75
Алатавинское	3,32	1,83	0,55
Карадагское	4,80	2,10	0,44
Гюздекское	5,90	2,57	0,44
Дуванинское	5,77	2,49	0,43
Среднее	4,22	1,99	0,52
Узбекистан			
Кара-Кушханинское	6,70	2,07	0,31
Среднее по всем месторождениям	5,47	1,91	0,39

в сравнении с дробилками сжатия может достигать двух крат в зависимости от физико-механических свойств дробимого материала. Это позволит снизить себестоимость готовой продукции металлургического, горного и строительного производств.

Выводы

В процессе разрушения хрупких материалов в конусной дробилке с упорами в дробимых кусках создается сдвиговое напряженное состояние. Для этого контакт между дробимым куском и упорами дробилки должен быть линейным (точечным в плане). Разрушение дробимого куска хрупкого изотропного материала происходит вдоль плоскости, проходящей через точки контакта куска с упорами дробилки. При дроблении

хрупких анизотропных материалов направление разрушения дробимых кусков зависит от случайных факторов. Разрушение материала в конусной дробилке с упорами является процессом более энергоэффективным по сравнению с процессом разрушения в дробилках сжатия, что позволяет использовать двигатели меньшей мощности и снизить расходы на электроэнергию. Теоретически снижение силы, необходимой на разрушение хрупких материалов, достигает двух крат. Процесс разрушения куска за счет сдвиговых сил и постоянный размер разгрузочной щели конусной дробилки с упорами обеспечивает снижение переизмельчения, получение на выходе кусков более однородного фракционного состава, что приводит к повышению качества готового продукта и снижению его себестоимости для металлургического, горного и строительного производств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Jeswiet J., Szekeres A. Energy consumption in mining comminution // *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 48. P. 140–145. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.250>
2. Лагунова Ю.А. Энергетическая модель процесса дробления горных пород сжатием // *Известия УГГУ*. 1997. № 6. С. 100–104.
3. Каменная кладка из пыльных известняков / С.В. Поляков, Ю.В. Измайлов, В.И. Коноводченко, Ф.М. Оруджев, Н.Д. Поляков. Кишинев, 1973. 345 с.
4. Atta K.T., Euzébio T., Ibarra H., Silva Moreira V., Johansson A. Extension, validation, and simulation of a cone crusher model // *IFAC-PapersOnLine*. 2019. Vol. 52. No. 14. P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.09.154>
5. Terva J., Kuokkala V.-T., Valtanen K., Siitonen P. Effects of compression and sliding on the wear and energy consumption in mineral crushing // *Wear*. 2018. Vol. 398–399. P. 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.004>
6. Lee E., Evertsson C.M. A comparative study between cone crushers and theoretically optimal crushing sequences // *Minerals Engineering*. 2011. Vol. 24. No. 3–4. P. 188–194. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.07.013>
7. Gupta A., Yan D.S. *Mineral Processing Design and Operation. An Introduction*. Elsevier Science, 2006. 693 p.
8. Gröndahl A., Asbjörnsson G., Hulthén E., Evertsson M. Diagnostics of cone crusher feed segregation using power draw measurements // *Minerals Engineering*. 2018. Vol. 127. P. 15–21. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.07.008>
9. Korman T., Bedekovic G., Kujundzic T., Kuhinek D. Impact of physical and mechanical properties of rocks on energy consumption of jaw crusher // *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2015. Vol. 51. No. 2. P. 461–475. <http://dx.doi.org/10.5277/ppmp150208>
10. Федотов К.В., Сенченко А.Е., Куликов Ю.В. Метод расчета удельной энергии само-/полусамоизмельчения на основе комбинации рабочих индексов Бонда // *ГИАБ*. 2014. № 11. С. 127–140.
11. Пат. 2430783 РФ. Способ дробления в валковой дробилке / Никитин А.Г., Сахаров Д.Ф., Прилукова Н.З.; опубл. 10.10.2011. Бюл. № 28.
12. Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Медведева К.С., Герике П.Б. Силовой анализ процесса разрушения хрупких материалов в одновалковой дробильной машине с упором на валке // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 4. С. 303–307. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-4-303-307>
13. Пат. 2453370 РФ. Щековая дробилка / Никитин А.Г., Люленков В.И., Сахаров Д.Ф., Витушкин А.В.; опубл. 20.06.2012. Бюл. № 17.
1. Jeswiet J., Szekeres A. Energy consumption in mining comminution. *Procedia CIRP*. 2016, vol. 48, pp. 140–145. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.250>
2. Lagunova Yu.A. Energy model of rocks crushing by compression. *Izvestiya UGGU*. 1997, no. 6, pp. 100–104. (In Russ.).
3. Polyakov S.V., Izmailov Yu.V., Konovodchenko V.I., Orudzhev F.M., Polyakov N.D. *Masonry from Saw Limestones*. Chisinau, 1973, 345 p. (In Russ.).
4. Atta K.T., Euzébio T., Ibarra H., Silva Moreira V., Johansson A. Extension, validation, and simulation of a cone crusher model. *IFAC-PapersOnLine*. 2019, vol. 52, no. 14, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.09.154>
5. Terva J., Kuokkala V.-T., Valtanen K., Siitonen P. Effects of compression and sliding on the wear and energy consumption in mineral crushing. *Wear*. 2018, vol. 398–399, pp. 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.004>
6. Lee E., Evertsson C.M. A comparative study between cone crushers and theoretically optimal crushing sequences. *Minerals Engineering*. 2011, vol. 24, no. 3–4, pp. 188–194. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.07.013>
7. Gupta A., Yan D.S. *Mineral Processing Design and Operation. An Introduction*. Elsevier Science, 2006, 693 p.
8. Gröndahl A., Asbjörnsson G., Hulthén E., Evertsson M. Diagnostics of cone crusher feed segregation using power draw measurements. *Minerals Engineering*. 2018, vol. 127, pp. 15–21. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.07.008>
9. Korman T., Bedekovic G., Kujundzic T., Kuhinek D. Impact of physical and mechanical properties of rocks on energy consumption of jaw crusher. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2015, vol. 51, no. 2, pp. 461–475. <http://dx.doi.org/10.5277/ppmp150208>
10. Fedotov K.V., Senchenko A.E., Kulikov Yu.V. Method of calculating specific energy of self-/semi-self-grinding based on a combination of Bond working indices. *GIAB*. 2014, no. 11, pp. 127–140. (In Russ.).
11. Nikitin A.G., Sakharov D.F., Prilukova N.Z. *Method of crushing in a roller crusher*. Patent RF no. 2430783. *Byulleten' izobretenii*. 2011, no. 28. (In Russ.).
12. Nikitin A.G., Epifantsev Yu.A., Medvedeva K.S., Gerike P.B. Power analysis of the process of brittle materials destruction in universal crushing machine with roll locker. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 4, pp. 303–307. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-4-303-307>
13. Nikitin A.G., Lyulenkov V.I., Sakharov D.F., Vitushkin A.V. *Jaw crusher*. Patent RF no. 2453370. *Byulleten' izobretenii*. 2012, no. 17. (In Russ.).

14. Evertsson C.M. Output prediction of cone crushers // *Minerals Engineering*. 1998. Vol. 11. No. 3. P. 215–231. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(98\)00001-6](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(98)00001-6)
15. Gaudie K. Performance of jaw crushers // *Engineering*. 1953. October. P. 485–486.
16. Whiten W.J. Simulation and model building for mineral processing. (PhD Thesis). University of Queensland (JKMRC). 1972. <https://doi.org/10.14264/uql.2015.62>
17. Li H., McDowell G., Lowndes I. Discrete element modelling of a rock cone crusher // *Powder Technology*. 2014. Vol. 263. P. 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.004>
18. Клушанцев Б.В. и др. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации. М.: Машиностроение, 1990. 320 с.
19. Сахаров Д.Ф., Витушкин А.В. Силовой анализ процесса дробления в конусной дробильной машине // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2018. Т. 61. № 12. С. 980–986. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-12-980-986>
20. Пат. 2526738 РФ. Роторное дробильное устройство / Люленков В.И., Никитин А.Г., Мочалов С.П., Матехина А.Н.; опубл. 27.08.2014. Бюл. № 24.
21. Родин Р.А. О работе, расходуемой на дробление горных пород // *Известия вузов. Горный журнал*. 1987. № 6. С. 84–89.
22. Степин П.А. Сопротивление материалов. М.: Интеграл-Пресс, 1997. 320 с.
14. Evertsson C.M. Output prediction of cone crushers. *Minerals Engineering*. 1998, vol. 11, no. 3, pp. 215–231. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(98\)00001-6](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(98)00001-6)
15. Gaudie K. Performance of jaw crushers. *Engineering*. 1953, October, pp. 485–486.
16. Whiten W.J. *Simulation and model building for mineral processing. (PhD Thesis)*. University of Queensland (JKMRC), 1972. <https://doi.org/10.14264/uql.2015.62>
17. Li H., McDowell G., Lowndes I. Discrete element modelling of a rock cone crusher. *Powder Technology*. 2014, vol. 263, pp. 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.004>
18. Klushantsev B.V., etc. *Crushers. Design, Calculation, Features of Operation*. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 320 p. (In Russ.).
19. Sakharov D.F., Vitushkin A.V. Power analysis of the crushing process in a cone crusher. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 12, pp. 980–986. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-12-980-986>
20. Lyulenkov V.I., Nikitin A.G., Mochalov S.P., Matekhina A.N. *Rotary Crushing Device*. Patent RF no. 2526738. *Byulleten' izobretenii*. 2014, no. 24. (In Russ.).
21. Rodin R.A. On the work spent on rocks crushing. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 1987, no. 6, pp. 84–89. (In Russ.).
22. Stepin P.A. *Resistance of Materials*. Moscow: Integral-Press, 1997, 320 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дмитрий Федорович Сахаров, к.т.н., старший научный сотрудник организационно-научного и редакционно-издательского отделения, Кузбасский институт ФСИН России

ORCID: 0000-0001-5691-0028

E-mail: sacharov_dima86@mail.ru

Александр Викторович Витушкин, к.т.н., старший преподаватель кафедры боевой и физической подготовки, Кузбасский институт ФСИН России

ORCID: 0000-0002-6297-1297

E-mail: mentisnoncorpus@gmail.com

Dmitrii F. Sakharov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Organizational, Scientific and Publishing Department, Kuzbass Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia

ORCID: 0000-0001-5691-0028

E-mail: sacharov_dima86@mail.ru

Aleksandr V. Vitushkin, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Military and Physical Training, Kuzbass Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia

ORCID: 0000-0002-6297-1297

E-mail: mentisnoncorpus@gmail.com

Поступила в редакцию 23.10.2020

После доработки 16.03.2021

Принята к публикации 02.04.2022

Received 23.10.2020

Revised 16.03.2021

Accepted 02.04.2022