

УДК 622.73:621.926

Надутый В.П., д-р техн. наук, профессор,
Логинова А.А., магистр,
Сухарев В.В., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
(ИГТМ НАН Украины)

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
УДАРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОГО ДЕЗИНТЕГРАТОРА, РЕАЛИЗУЮЩЕГО
СДВИГОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГОРНОЙ МАССЫ**

Надутый В.П., д-р техн. наук, професор,
Логінова А.О., магістр,
Сухарєв В.В., канд. техн. наук, ст. наук. співр.

**ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ
УДАРНО-ВІДЦЕНТРОВОГО ДЕЗИНТЕГРАТОРА, ЩО РЕАЛІЗУЄ
ЗСУВНІ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ РУЙНУВАННІ ГІРСЬКОЇ МАСИ**

Naduty V.P., D.Sc. (Tech.), Professor,
Loginova A.A., M.S (Tech)
Sukharyev V.V., Ph.D. (Tech.), Researcher,
(IGTM NAS of Ukraine)

**EFFECTIVENESS OF THE USE OF SHOCK-CENTRIFUGAL
DISINTEGRATOR IMPLEMENTING SHEAR DEFORMATION IN ROCK
MASS DESTRUCTION**

Аннотация. В статье представлено обоснование использования новой конструкции дезинтегратора, реализующего преимущественно механизм разрушения при сдвиговых деформациях как наиболее энергосберегающий и эффективный, основываясь на анализе напряженного состояния образцов горных пород при одноосном нагружении. Рассмотрена новая конструкция ударно-центробежного дезинтегратора двухвального типа, где валы роторов разнесены в отдельные камеры. Основными преимуществами данной конструкции является распределение нагрузки на два вала и использование энергии двух встречных потоков для разрушения частиц горной массы как за счет энергии соударения при их столкновении, так и за счет сдвиговых деформаций при трении частиц на большой скорости во встречных потоках. Также в статье представлены данные экспериментов по измельчению горной массы, проведенных на двухвальном дезинтеграторе, которые показали, что выход измельченного материала крупностью менее 100 мкм более чем в 2,5 раза превышает показатели одновального дезинтегратора. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности применения двухвального дезинтегратора.

Ключевые слова: дезинтегратор, удар, сдвиг, разрушение, горная масса, эффективность, производительность.

Введение. Одними из энергоемких процессов при добыче и переработке полезных ископаемых являются процессы дробления и измельчения с целью доведения продукта до требуемой крупности.

Эти операции осуществляются постадийно по мере снижения крупности перерабатываемой горной массы дробилками и мельницами различных конструкций и принципов действия.

В последние годы начали широко использоваться дробилки и мельницы (дезинтеграторы) ударно-центробежного типа, особенно на мелких стадиях дробления и измельчения. Они позволяют совмещать несколько стадий дезинтеграции, имеют по сравнению с другими типами более низкое энергопотребление при высокой степени получения мелкого продукта [1], что очень важно при подготовке горной массы к обогащению [2].

К настоящему времени ударно-центробежные дезинтеграторы серийно выпускаются заводами многих компаний США, Швеции, Германии, России, Новой Зеландии, Чехии, Беларуси. Начато освоение их выпуска в Украине [3]. Выпускаются различные типы и типоразмеры этих машин, отличающихся по производительности, и для пород различной крепости. Однако кинематически они разнятся незначительно. Крупность конечного продукта этих машин в значительной степени зависит от времени измельчения и частоты вращения ротора, которая определяет силу ударного импульса разгоняемых частиц горной массы о преграду, что и определяет основной принцип работы машин этого типа. При этом в камере дробления или измельчения куски горной массы приводятся в движение вращающимися разгонными ребрами (лопатками или билами) и дробятся, ударяясь с большой скоростью об отбойные плиты камеры.

По этому принципу созданные конструкции делятся на две основные группы, в одной из которых реализован принцип разрушения при ударе куска горной породы о металл брони камеры, а во второй удар происходит о куски породы, находящиеся в специальных карманах рабочей камеры. Такое решение связано с разной степенью абразивности пород, износом брони рабочей камеры и от характера соударения. По этому принципу в значительной степени определяется область использования дезинтегратора для пород различной крепости и абразивности.

Общим для обоих вариантов исполнения является тот факт, что разрушение кусков горной массы при ударе достигается тогда, когда сжимающие напряжения в нем превышают допустимые для перерабатываемой породы, а общим недостатком – высокий износ лопаток и камеры, который носит ударно-абразивный характер.

Одно из перспективных направлений в поиске более совершенных конструкций ударно-центробежных дезинтеграторов для повышения их надежности, снижения энергопотребления основывается на анализе уравнений кинетики измельчения минерального сырья, учитывающем основные положения механики разрушения твердых тел. Известно, что сопротивление горной массы приложенному усилию при разрушении пропорционально количеству энергии механического воздействия. Причем, эта зависимость сохраняется при любых видах напряжения или механизма воздействия в процессе разрушения пород.

Известный закон Реттингера устанавливает пропорциональность между

расходом энергии при измельчении и образованной площадью поверхности разрушения, которая не зависит от характера механического воздействия. Поэтому при одинаковых показателях разрушения горной породы подведенная энергия процесса является постоянной величиной, напрямую связанной с пределом прочности породы. Этот факт учитывается в процессе создания или модернизации оборудования путем максимальной возможности приложения энергии для разрушения образцов породы, обеспечивая при этом минимизацию механического воздействия на рабочий орган самой машины. Такой подход повышает эксплуатационные, технологические и экономические ее показатели, а также стоимость. Достигается это не только повышением прочностных характеристик узлов машины или улучшением ее кинематики, но и учетом механизма разрушения с преобладанием касательных напряжений.

Такой подход основывается на учете теории разрушения крепких руд Кулоном, который убедительно доказал, что максимальные касательные напряжения в образце, при которых начинается его разрушение, значительно меньше напряжений при сжатии образца. Полученный критерий разрушения горных пород Кулона указывает на преимущественное использование сдвиговых деформаций при реализации механизма дезинтеграции горных пород.

Действие нормальных и касательных напряжений в плоскости разрушения горных пород подробно изучены Навье. В результате теории Кулона - Навье и бесчисленных результатов исследований многими учеными [4], а также на основании опыта эксплуатации измельчительного оборудования установлено [5], что, если прочность горной породы на сжатие в несколько раз выше, чем при сдвиге, то и энергоемкость ее разрушения при дезинтеграции по механизму реализации сдвиговых деформаций будет значительно меньше.

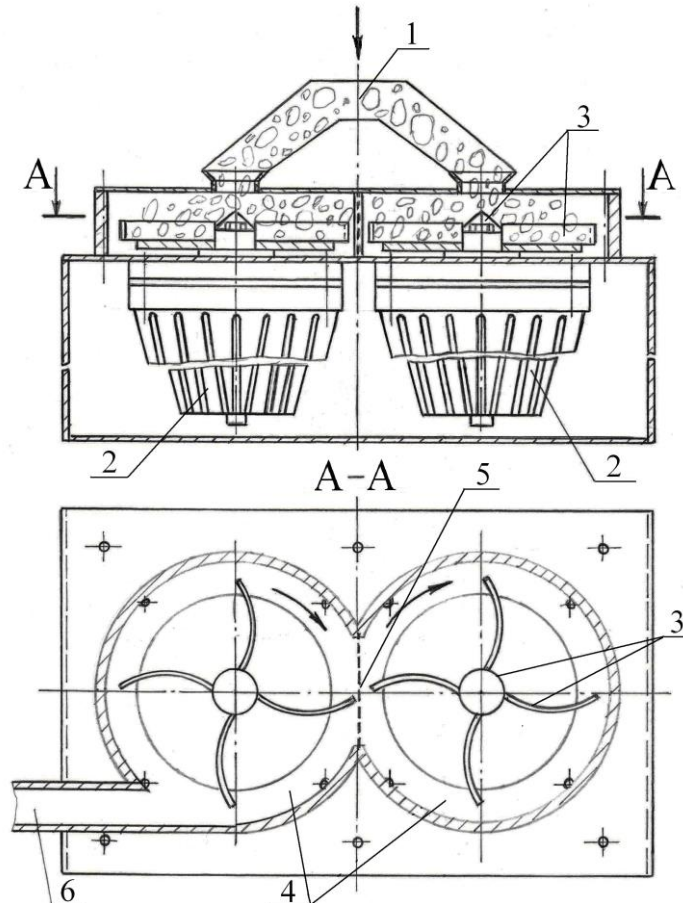
Существующие к настоящему времени методы расчетов деформирования твердых тел учитывают этот важный вывод. Разработанная теория упругости указывает, что модуль любого материала на сжатие в три раза выше его модуля на сдвиг. Но при исследованиях прочности горных пород на сжатие и сдвиг получены соотношения такого повышения более чем в 10 раз. В этом случае необходимо учитывать влияние объемного модуля сжатия, когда при точечном приложении силы к образцу его деформации сжатия в зоне действия силы препятствует окружающий объем. Поэтому, чем мельче кусковатость перерабатываемой горной породы, тем меньше усилие для ее измельчения и энергоемкость процесса.

Целью данной работы является создание новых конструкций дезинтеграторов и обоснование эффективности их применения, основываясь на анализе напряженного состояния образцов горных пород при одноосном нагружении, реализующих преимущественно механизм разрушения при сдвиговых деформациях как наиболее энергосберегающий и эффективный.

Один из вариантов такого дезинтегратора предложен авторами. При создании его конструкции за основу взята одновальная центробежная дробилка (мельница). Разрушение горной массы в ней происходит за счет разгона

вращающимся ротором и билами кусков руды с последующим ударом их о стенки камеры. Сила удара регулируется и зависит от количества оборотов ротора, диаметра камеры, массы кусков, а также от жесткости поверхности соударения. Разрушение происходит за счет деформации сжатия при ударе куска о стенки камеры в случае превышения предела прочности горной породы при ударных нагрузках. Этот принцип дезинтеграции имеет свои преимущества перед остальными механизмами (валковыми, щековыми, шаровыми, вибрационными), поскольку он менее энергоемкий, позволяет совмещать минимум две стадии измельчения при достаточно высокой эффективности процесса. Однако его широкое использование сдерживается имеющимися недостатками: интенсивная динамика ротора и подшипникового узла, значительный абразивный износ биллов ротора и рабочей поверхности камеры. При разрушении пород высокой твердости необходимы большие обороты ротора, что отрицательно сказывается на его сроке службы.

Авторами предложена конструкция двухвального рабочего органа, когда валы роторов разнесены в отдельные камеры. Общий вид конструкции представлен на рис. 1.



- 1 – узел загрузки горной массы; 2 – электропривод;
 3 – ротор с лопатками; 4 – рабочие камеры; 5 – область встречи потоков горной массы при вращении роторов; 6 – разгрузка измельченной горной массы

Рисунок 1 – Схема конструкции двухвального ударно-центробежного дезинтегратора

При двухвальном исполнении рабочего органа нагрузка (при равной производительности с одновальным) распределяется на два вала, чем понижается напряженное состояние рабочего органа (камеры и ротора с лопатками). При этом потоки горной массы лопатками роторов направляются навстречу друг другу, и на участке между двумя камерами эти потоки сталкиваются. Такое движение потоков позволяет увеличивать энергию соударения частиц в два раза без дополнительного подведения мощности или увеличения скорости вращения роторов. Кроме того, при встречном движении потоков и усилении ударного взаимодействия частиц при лобовом столкновении имеет место касательное взаимодействие между встречными потоками, при котором реализуется сдвиговый механизм разрушения. Поскольку это происходит в массовом объеме, то эффективность дезинтеграции резко возрастает, а энергопотребление снижается, так как процесс во времени проходит, как минимум, в два раза быстрее. Основной процесс разрушения частиц происходит на площадке встречи потоков между камерами, и вся энергия абразивного взаимодействия, в основном, используется на дезинтеграцию горной массы, а не на износ элементов рабочего органа.

Таким образом, основными отличиями предложенной конструкции дезинтегратора являются: распределение нагрузки на два вала; использование энергии двух встречных потоков для разрушения частиц горной массы как за счет энергии соударения при их столкновении, так и за счет сдвиговых деформаций при трении частиц на большой скорости во встречных потоках.

Работоспособность и эффективность работы предложенной конструкции дезинтегратора определялась на лабораторной установке, изготовленной в соответствии со схемой, показанной на рис. 1. В качестве материала для измельчения использовался гранитный отсев крупностью –10 мм. Результаты исследований, представленные в табл. 1, свидетельствуют о том, что наиболее эффективно использовать дезинтегратор для получения мелких и тонких фракций при исходной крупности менее 10 мм.

Таблица 1 – Результаты исследований двухкамерного ударно-центробежного дезинтегратора

№ опыта	Измельчаемый материал	Количество камер, шт.	Крупность материала, мм	Обороты двигателя, об/мин.	Мощность на измельчение, Вт	Время измельчения 1 кг, сек.	Производительность, кг/ч	Процентное распределение классов крупности после измельчения, %					
								– 50 мк	–100 +50 мк	–2,5 мм +100 мк	–5,0 +2,5 мм	–7,0 +5,0 мм	–10,0 +7,0 мм
1	Гранит	1	–10+7	2800	46	120	30	0,9	1,1	8,0	8,9	19,3	61,8
2		2	–10+7	2800	92	90	40	2,5	3,0	31,5	20,8	17,1	25,1
3		2	–10+7	3780	114	70	51	5,0	5,0	33,6	17,9	15,1	22,8
4		2	–10+7	4760	123	60	60	8,0	8,0	45,3	16,1	11,7	10,9
5		2	–7+5	2800	74	70	51	3,0	2,9	29,1	34,9	30,1	0
6		2	–5+2,5	2800	55	55	65	2,5	3,0	34,2	60,3	0	0

Например, при крупности загружаемого гранита менее 5,0 мм расход мощности привода в двухвальном варианте сопоставим с одновальным, но время измельчения и производительность более чем в 2 раза выше, а выход измельченного материала крупностью менее 100 мкм более чем в 2,5 раза превышает показатели одновального.

Наблюдается существенное влияние количества оборотов роторов, но этот показатель требует отдельных исследований для горной массы различной крепости. На данном этапе исследований решалась задача сравнительного анализа по режимным и технологическим показателям.

Выводы. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности изготовления двухвального дезинтегратора конструкции в качестве опытного образца для проведения промышленных испытаний и получения информации для дальнейшего совершенствования новой конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сокур, Н.И. Центробежные дробилки : монография / Н.И. Сокур, И.Н. Сокур, Л.М. Сокур. – Кременчуг: КДПУ, 2009. – 202 с.
2. Биленко, Л.Ф. Приоритетные направления повышения селективности раскрытия минералов в процессах подготовки руды к обогащению / Л.Ф. Биленко // Вестник НГУ «ХПИ». – Харьков: ХПИ, 2012. – Вып. 59. – С. 3-12.
3. Сокур, Н.И. Дробление и измельчение руд / Н.И. Сокур, В.Н. Потураев, Е.К. Бабец. – Кривой Рог: ВЭЖА, 2000. – 290 с.
4. Подготовительные процессы: Справочник по обогащению руд. / Под ред. О.С. Богданова, В.А. Олевского. – М.: Недра, 1982. – 366 с.
5. Логинова, А.А. Анализ особенностей рабочего процесса и конструкций опорного узла ударно-центробежной дробилки с вертикальным валом рабочего органа / А.А. Логинова, К.А. Зиборов, М.Н. Трубицин // Горная электромеханика и автоматика. – Днепропетровск: ГВУЗ «НГУ», 2014. – Вып. 91. – С. 131-137.
6. Дырда, В.И. Некоторые проблемы энергосбережения при разрушении минерального сырья в ударно-центробежных дробилках / В.И. Дырда, А.А. Логинова // Геотехническая механика : Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2015. – Вып.121. – С. 121-125.

REFERENCES

1. Sokur, N.I., Sokur, I.N. and Sokur, L.M. (2009), *Tsentrobezhnye drobilki* [Centrifugal crushers], KDPU, Kremenchug, Ukraine.
2. Bilenko, L.F. (2012), "Priority areas for increasing the selectivity of mineral opening in the processes of preparing the ore for enrichment", *Vestnik NGU «KHPI»*, no. 59, pp. 3-12.
3. Sokur, N.I., Poturayev, V.N. and Ye.K. Babets (2000), *Drobleniye i izmelcheniye rud* [Crushing and grinding of ore], Vezha, Krivoy Rog, Ukraine.
4. Bogdanov, O.S. and Olevskiy, V.A. (ed.) (1982), *Podgotovitelnye processy: Spravochnik po obogashcheniyu rud* [The preparatory processes: Reference book on the ore-dressing], Nedra, Moscow, SU.
5. Loginova, A.A., Ziborov, K.A. and Trubitsin, M.N. (2014), "Analysis of workflow features and structures support unit shock-centrifugal crushers with a vertical shaft working body", *Gornaya elektromekhanika i avtomatika, GVUZ «NGU»*, no. 91, pp. 131-137.
6. Dyrda, V.I. and Loginova, A.A. (2015), "Some problems of energy-economy at destruction of mineral raw material in shock-centrifugal crushers", *Geo-Technical Mechanics*, no. 121, pp. 121-125.

Об авторах

Надутый Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, *nadutyvp@yandex.ua*.

Логинова Анастасия Александровна, инженер отдела механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ

НАН України), Днепр, Україна, logan.anlim@gmail.com.

Сухарев Виталий Витальевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, agnivik@ukr.net.

About the authors

Nadutyi Vladimir Petrovich, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of Department of Geodynamic Systems and Vibration Technologies, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnepr, Ukraine, nadutyvp@yandex.ua.

Loginova Anastasiya Aleksandrovna, Engineer in Department of Geodynamic Systems and Vibration Technologies, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnepr, Ukraine, logan.anlim@gmail.com

Sukharyev Vitaliy Vitalievich, Candidate of Technical Sciences (Rh.D), Senior Researcher in Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnepr, Ukraine, agnivik@ukr.net.

Анотація. У статті представлено обґрунтування використання нової конструкції дезінтегратора, що реалізує переважно механізм руйнування при зсувних деформаціях як найбільш енергозберігаючий і ефективний, ґрунтуючись на аналізі напруженого стану зразків гірських порід при одноосьовому навантаженні. Розглянуто нову конструкцію ударно-відцентрового дезінтегратора двовального типу, де вали роторів рознесені в окремі камери. Основними перевагами даної конструкції є розподіл навантаження на два вали і використання енергії двох зустрічних потоків для руйнування частинок гірської маси як за рахунок енергії співудару при їх зіткненні, так і за рахунок зсувів при терті частинок на великій швидкості у зустрічних потоках. Також в статті наведено дані експериментів з подрібнення гірської маси, проведених на двовальному дезінтеграторі, які показали, що вихід подрібненого матеріалу розміром меншим за 100 мкм більш ніж у 2,5 рази перевищує показники одновального дезінтегратора. Отримані результати свідчать про доцільність застосування двовального дезінтегратора.

Ключові слова: дезінтегратор, удар, зсув, руйнування, гірська маса, ефективність, продуктивність.

Abstract. The article presents grounds for use of a newly-designed disintegrator, which implements predominantly rock-breaking mechanism with the shear deformations. Analysis of the rock-sample stress state under the uniaxial loading has shown that this design is the most energy-saving and efficient one. A new design of the shock-centrifugal disintegrator of the twin-shaft type, in which rotor shafts are spaced apart in separate chambers, is also considered. The main advantages of this design are that a load is distributed on the two shafts, and energy of two counter flows is used for breaking rock particles both by collision energy when the particles collide, and by shear deformation due to the particle friction at high speed in the counter flows. The article also presents experimental data on the rock mass crushing by the twin-shaft disintegrator, which showed that the output of material with size less than 100 microns crushed by the twin-shaft disintegrator was more than 2.5 times higher than for the single-shaft disintegrator. The results obtained confirm feasibility of the twin-shaft disintegrator use.

Keywords: disintegrator, shock, shear, fracture, rock mass, efficiency, productivity.

Стаття поступила в редакцію 6.12. 2016

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук Б.А. Блюссом