

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ СЛАБЫХ ГОРНЫХ ПОРОД, ОБЛАДАЮЩИХ ПЛАСТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ, ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КОМПЛЕКСНОГО АГРЕГАТА ДЛЯ ИХ ПЕРЕРАБОТКИ

И.В. Горлов<sup>1</sup>, П.Е. Митусов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Тверской государственный технический университет, Тверь, Россия, e-mail: gorloviv@yandex.ru

<sup>2</sup> Московский научно-исследовательский проектно-исследовательский институт технологий и инноваций, Москва, Россия

**Аннотация:** Повышению эффективности переработки горных пород во всем мире уделяется огромное внимание. Однако в настоящее время не существует единых методик, позволяющих проводить такую оценку для различных по свойствам материалов. В данной работе проводится анализ существующих в настоящее время методик определения параметров разрушения горных пород и предлагается новый подход при анализе процессов измельчения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами. Проведен анализ основ теории разрушения горных пород, а также типовых методов измельчения и классификации материалов. Обосновывается потребность создания нового типа оборудования для комплексной переработки слабых материалов, которые обладают существенными пластическими свойствами. Такое оборудование позволяет проводить в рамках одного цикла измельчение и одновременно классификацию слабых горных пород, минуя промежуточное хранение и транспортировку продукта переработки. Разработана принципиальная конструкция комплексного агрегата – измельчителя-классификатора, описывается принцип его действия, представлены некоторые составляющие инженерных расчетов для определения наиболее значимых параметров технологического процесса переработки слабых пород, обладающих пластическими свойствами. Приведены результаты анализа повышения эффективности использования измельчителя-классификатора при переработке слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами.

**Ключевые слова:** разрушение, измельчение, классификация горных пород, энергетический метод, поля линий скольжения, сдвиговые напряжения, комплексный агрегат, вал-измельчитель, перфорированный барабан, эффективность.

**Для цитирования:** Горлов И. В., Митусов П. Е. Анализ эффективности процесса разрушения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, при проектировании комплексного агрегата для их переработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 4. – С. 47–58. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_4\_0\_47.

### Analysis of disintegration efficiency in soft rocks with plastic properties in design of compound assembly for such rock processing

I.V. Gorlov<sup>1</sup>, P.E. Mitusov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tver State Technical University, Tver, Russia, e-mail: gorloviv@yandex.ru

<sup>2</sup> Moscow Research Design and Survey Institute of Technology and Innovation, Moscow, Russia

---

**Abstract:** Immense attention is given to stimulation of rock processing efficiency in the world. However, there are yet no unified procedures for the evaluation of disintegration efficiency in materials with different properties. This study analyzes current techniques in determination of rock fracture parameters and puts forward a new approach to investigation of grinding processes in soft rocks with plastic properties. The theoretic framework of rock fracture as well as the standard methods of grinding and classification of different materials are reviewed. It is justified that it is necessary to create a new type equipment for integrated processing of weak materials with soft properties. Such equipment makes it possible to perform simultaneously grinding and classification of soft rock particles within a single cycle, without interim storage and transportation of middlings. Conceptual design of a compound assembly—a disintegrator-classifier—is developed, its operating principle is described, and engineering analysis of the most significant parameters of processing soft rocks with plastic properties is partially discussed. The results of the efficiency enhancement in processing of soft rocks with plastic properties using the disintegrator-classifier are presented.

**Key words:** fracture, disintegration, rock classification, energy method, fields of slip line, shear stresses, compound assembly, shaft-disintegrator, perforated cage, efficiency.

**For citation:** Gorlov I. V., Mitusov P. E. Analysis of disintegration efficiency in soft rocks with plastic properties in design of compound assembly for such rock processing. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(4):47-58. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_4\_0\_47.

---

## Введение

Горная промышленность во всем мире развивается в направлении повышения эффективности технологий добычи полезных ископаемых, а также их переработки. При создании горного оборудования в ряде случаев уделяется недостаточное внимание конкретным условиям, в которых оно будет эксплуатироваться. Например, при производстве строительных материалов используются горные породы, которые существенно отличаются своими свойствами, и без их учета невозможно добиться высокой эффективности процессов переработки. Так, при измельчении пород средней и малой прочности, таких как каолиновые глины, влажные известняки, тальк, мел, гипс [1, 2], зачастую не учитываются их существенные пластические свойства. Повышенная пластичность таких материалов приводит к снижению эффективности процесса переработки более чем на 40% при использовании типовых барабанных

мельниц [3–6] по сравнению с переработкой пород, не обладающих такими свойствами.

Типовое оборудование хотя и имеет возможность реализовывать достаточно широкий перечень технологических задач на основе известных методов разрушения горных пород, но это приводит зачастую к дополнительным потерям при переработке горных пород средней и малой прочности, вследствие избыточной металлоемкости агрегатов, которые не учитывают также пластические свойства таких материалов.

При этом оборудование, предназначенное для переработки пластичных горных материалов, в нашей стране фактически не производится.

Следовательно, для повышения эффективности переработки пластичных горных пород слабой прочности необходимо разрабатывать специализированное оборудование, предназначенное для таких материалов.

### Анализ измельчительных агрегатов в зависимости от фактора воздействия на породу

Во всем мире используется измельчительное оборудование, которое может реализовывать различные виды воздействия на разрушаемую породу: разламывание и раскалывание; раздавливание и истирание с раздавливанием; удар и удар с истиранием; коллоидная обработка и др. [7].

Кроме того, по Э.А. Хопунову [8], оборудование можно классифицировать по факторам воздействия на породу: нагрузка, длительность нагрузки и место ее приложения (таблица). Исходя из анализа представленных факторов воздействия для представленного оборудования, видно, что для существующих методов измельчения, как правило, трудно провести оценку энергетических затрат теоретически, вследствие взаимного влияния одновременно действующих факторов.

Исходя из представленных факторов воздействия для существующего измельчительного оборудования, видно, что валковый пресс является самым пер-

спективным агрегатом, с точки зрения переработки слабых горных пород, обладающих существенными пластическими свойствами. Конструкция валкового пресса похожа на конструкцию валковой дробилки, но валковый пресс воздействует на горную массу по-другому. Измельчение в валковом прессе происходит в закрытом объеме, это не позволяет отдельным элементам породы покидать зону деформации, что способствует повышению производительности процесса, а так как частицы породы при этом взаимодействуют между собой, то повышается эффективность передачи энергии разрушения, а также уменьшается износ рабочих поверхностей агрегатов, по сравнению с другими типами измельчителей.

В процессе измельчения при использовании типовых устройств эффективность переработки может снижаться из-за того, что в зоне разрушения присутствуют частицы, которые не требуют дальнейшего измельчения вследствие своего размера, но продолжают измельчаться. Данный процесс приводит к переизмельчению и дополнительным затратам энер-

### Анализ измельчительных агрегатов в зависимости от фактора воздействия Analysis of grinding units depending on the impact factor

Агрегат	Факторы воздействия										
	Вид нагрузки					Длительность нагрузки		Место приложения			
	жесткая	мягкая	циклическая	однократная	спектр сил		квази-стационарная	ударная	объемное	одиночное	истирание
					узкий	широкий					
Конусная дробилка	+				+		+			+	
Щековая дробилка	+		+		+		+				
Роторная дробилка		+			+		+			+	
Центробежная дробилка		+				+	+	+	+	+	
Конусная инерционная дробилка		+	+		+		+		+	+	+
Валковый пресс	+			+	+		+		+	+	
Барабанная мельница		+		+		+	+			+	+

гии. Таким образом, повышение эффективности переработки невозможно без внесения в конструкцию разрабатываемых комплексных агрегатов устройств для удаления кондиционных частиц из зоны разрушения.

После этапа измельчения получается продукт, который содержит в себе частицы различной фракции, которые подвергаются дальнейшей классификации с разделением на отдельные фракции и отделением кондиционного продукта, при этом более крупные фракции отправляются на вторичную переработку. Для классификации горных пород могут использоваться различные виды классификаторов (механические, пневматические, гидравлические, и др.). Применение тех или иных устройств для классификации конкретных пород обусловлено их свойствами и реализуется на основе различных механизмов.

Большое применение в горной промышленности получили механические классификаторы, которые обеспечивают высокую производительность процесса при относительно небольшом энергопотреблении. Механические классификаторы производят качественное разделение частиц по фракциям с использованием калиброванных решеток.

В нашем случае наиболее интересны барабанные грохоты, которые являются агрегатами непрерывного действия и могут использоваться для пород с различными свойствами, что обеспечивает им высокие перспективы. Кроме того, барабанный грохот может применяться для классификации трудногрохотимых материалов, обладающих существенными пластическими свойствами.

Однако у барабанных грохотов есть существенный недостаток — снижение эффективности классификации из-за увеличения концентрации частиц мелких фракций в исходном материале. Для снижения негативного эффекта рядом

ученых предложены формулы, которые позволяют на этапе подготовки проводить теоретические исследования процесса классификации для выявления наиболее выгодных режимов грохочения для барабанных классификаторов.

Для уменьшения затрат суммарной энергии при измельчении и классификации требуется провести теоретический анализ разрушения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, выявить закономерности деформации при измельчении и разработать конструкцию комплексного агрегата — измельчителя-классификатора, с помощью которого можно повысить эффективность такого комбинированного процесса за счет использования синергетического эффекта.

### **Исследование основных теорий разрушения горной породы**

До настоящего времени не решена в полной мере проблема теории разрушения пластичных горных пород, что не позволяет с достаточной точностью определять рациональные режимы переработки таких материалов.

Изначально при решении проблемы теоретического анализа разрушения горных пород считали, что энергия, затрачиваемая на разрушение, в большей мере зависит от отношения площадей частиц до и после измельчения (гипотеза Риттенгера). Дальнейшие исследования показали, что необходимо учитывать предел прочности на сжатие и объем разрушения материала (гипотеза Кирпичева-Кика). Однако такой подход к решению проблемы разрушения горных пород не давал приемлемых результатов для практического применения, и тогда Ф.Ч. Бонд предложил определять энергию разрушения с учетом коэффициентов пропорциональности, полученных эмпирически. Позднее А.К. Рунквист развил эту теорию и предложил при расче-

тах учитывать еще и степень измельчения. На основе анализа изложенных теорий В. Елисеев предложил для анализа разрушения горных пород использовать модифицированное выражение для расчета энергии разрушения:

$$A = B \lg \frac{S_k}{S_0} + C(S_k - S_0),$$

где  $S_0$  и  $S_k$  — соответственно суммарные площади поверхностей элементов породы до и после разрушения;  $B$  и  $C$  — коэффициенты, полученные эмпирически [2].

Однако при проведении экспериментальных исследований было установлено, что с уменьшением размеров измельчаемых элементов породы увеличивается энергопотребление на разрушение, поэтому необходимо уточнение предела прочности материала:

$$\sigma = \sigma_0 + k_1 \sqrt{x},$$

где  $\sigma_0$  — величина предела прочности исследуемой горной породы, установленная по стандартной методике;  $k_1$  — размер элементов породы до измельчения;  $x$  — поправочный коэффициент, отвечающий за свойства конкретного материала:

$$k_1 = \sqrt{\frac{6\pi\gamma G}{1-\nu}},$$

где  $\gamma$  — поверхностная энергия разрушения, приходящаяся на единицу площади частицы;  $G$  — предел прочности на сдвиг рассматриваемой горной породы;  $\nu$  — коэффициент Пуассона [2].

В процессе измельчения изменение работы разрушения можно определить, задавая величину уменьшения размера частицы  $x - \Delta x$ :

$$\Delta A = A' - A'' = \frac{(\sigma_0 + k_1 \sqrt{x})^2 x^3}{2E} - \frac{(\sigma_0 + k_1 \sqrt{x - \Delta x})^2 (x - \Delta x)^3}{2E} \quad (1)$$

При бесконечно малом приращении частицы выражение будет следующим:

$$dA_0 = - \frac{\left( \frac{3\sigma_0^2}{x} + \frac{5\sigma_0 k_1}{\sqrt{x^3}} + \frac{2k_1^2}{x^2} \right) dx}{2E}. \quad (2)$$

Используя формулу (2), можно определить суммарную работу, необходимую для уменьшения размеров частиц материала от изначального размера  $D$  до  $d$ :

$$A_0 = - \frac{3\sigma_0^2}{2E} \int_D^d \frac{dx}{x} - \frac{5\sigma_0 k_1}{2E} \int_D^d \frac{dx}{\sqrt{x^3}} - \frac{k_1^2}{E} \int_D^d \frac{dx}{x^2} \quad (3)$$

На основе выражения (3) для рассматриваемых размеров элементов горной породы возможно определить работу, которая затрачивается на измельчение:

$$A_0 = \frac{3\sigma_0^2}{2E} \ln \frac{D}{d} + \frac{5\sigma_0 k_1}{2E} \left( \frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}} \right) + \frac{k_1^2}{E} \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right) \quad (4)$$

В целом полученные выражения не противоречат экспериментальным данным. Кроме того, экспериментальные исследования разрушения ряда материалов при измельчении показали, что энергия разрушения нелинейно изменяется с уменьшением величины частиц. При размерах частиц менее 1 мм энергия разрушения растет кратно [9].

Рассмотренные ранее гипотезы разрушения горной породы в основном нашли отражение в формуле (4), но она не учитывает конкретных условий нагружения элементов породы.

Значительное различие механических свойств разных горных пород не позволяет получить универсальных выражений для определения энергозатрат при измельчении, поэтому большинство исследователей для изучения процессов разрушения используют эмпирические данные, полученные для типовых агре-

готов. Такой подход не всегда дает возможность выявить необходимые закономерности процессов разрушения, что не обеспечивает в ряде случаев достижение высокой эффективности переработки материалов.

Рядом исследований было установлено, что в условиях всестороннего сжатия горные породы приобретают развитые пластические свойства [10–14]. В соответствии с этими свойствами получены выражения, позволяющие проводить анализ поверхностей предельной текучести и пластического потенциала при сдвиговом разрушении горного массива.

Доказано, что при достижении материалом предельного состояния (углы сдвига достигают  $45^\circ$  от направления действующей силы) рассматриваемые зависимости соответствуют критерию пластичности Треска–Сен-Венана. Следовательно, после всестороннего сжатия породы, обладающие пластическими свойствами, ведут себя аналогично жестко-идеально-пластическим материалам, и зависимости, полученные для них на основе энергетического метода расчета, могут быть использованы при анализе разрушения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами [15–18].

Приближенный энергетический метод расчета основывается на экстремальных принципах пластичности. Для анализа контактных давлений используются упрощенные в виде простых геометрических фигур поля линий текучести, ко-

торые соответствуют граничным условиям по скоростям и перемещениям. При этом для анализа, полученного на основе данного подхода решения, достаточно использовать графостатический метод расчета.

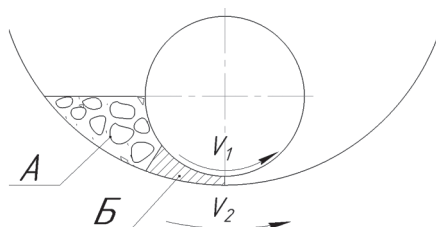
### Разработка конструкции измельчителя-классификатора

Анализ существующего дробильно-сортировочного оборудования показал, что в настоящее время отсутствуют специализированные агрегаты для комплексной переработки пород, обладающих пластическими свойствами, которые объединяют в себе функции измельчителей и классификаторов, но есть оборудование (валковые прессы и барабанные грохоты), на основе конструкции которых можно разработать такой агрегат [19].

Комплексный агрегат представляет барабан с установленным внутри него валом-измельчителем, рабочее пространство которого, показано на рис. 1.

На рис. 2 представлена модель зоны разрушения Б и соответствующее ей поле линий скольжения.

В зоне А происходит предварительное уплотнение измельчаемой породы. При этом происходит предварительная пластическая деформация менее твердых крупных элементов породы, а мелкие элементы распределяются вокруг них. На данном этапе затраты энергии на протекание процесса уплотнения породы для упрощения учитываться не будут.



$V_1$  – тангенциальная скорость вала-измельчителя  
 $V_2$  – тангенциальная скорость барабана  
 А – зона, внутри которой происходит предварительное уплотнение  
 Б – зона разрушения горной породы

Рис. 1. Рабочее пространство комплексного агрегата  
 Fig. 1. Diagram of the working space of the grinding unit

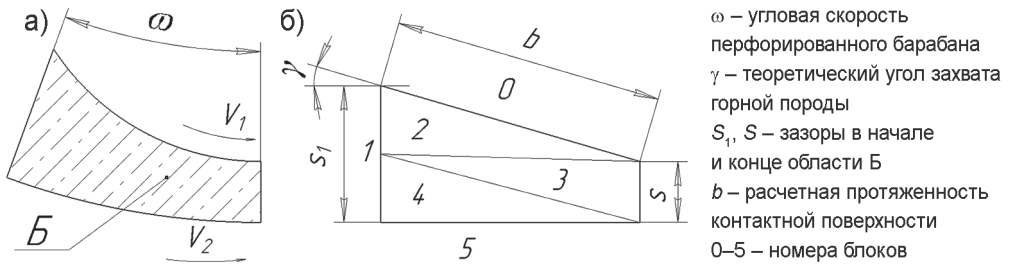


Рис. 2. Область пластической деформации в области Б (а) и кинематически возможное поле линий скольжения в области Б (б)

Fig. 2. The region of plastic deformation in region B (a), and the kinematically possible field of slip lines in region B (b)

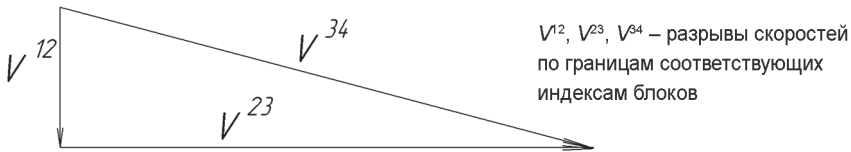


Рис. 3. План скоростей, соответствующий полю линий скольжения, показанному на рис. 2

Fig. 3. Velocity plan corresponding to the field of slip lines shown in Fig. 2

На рис. 3 показан план скоростей, соответствующий кинематически возможному полю линий скольжения, представленному на рис. 2.

В зоне Б уплотненная масса интенсивно разрушается за счет пластической деформации, анализ которой будем проводить с помощью предложенного выше метода расчета. Давление, действующее на рабочие поверхности агрегата, полученное на основе энергетического метода, будет являться верхней границей для действительной величины.

$$\frac{q}{2k} = \frac{\sum_i v_i l_i + 2\mu \sum_j v_j l_j}{2}, \quad (5)$$

где  $k$  – предел прочности на сдвиг;  $l_i, l_j$  – значения длин линий скольжения между соседними блоками (рис. 2);

$v_i, v_j$  – величины разрывов скоростей (рис. 3);  $\mu$  – коэффициент трения породы по рабочим поверхностям агрегата.

Данная схема позволяет графоаналитически [16, 17] рассчитать давление на рабочие поверхности агрегата в области Б. Используя выражение (5), при условии отсутствия проскальзывания породы по рабочим поверхностям агрегата давление будет равно

$$\frac{q}{2k} = 0,5 \sum_i v_i l_i. \quad (6)$$

Для представленного поля линий скольжения на основе графоаналитического расчета были получены значения  $v_i$  и  $l_i$ .

$$v^{12} = 1; v^{34} = 4,38; v^{23} = 4,23; v^{14} = 1.$$

$$l^{12} = 0,25; l^{34} = 0,99; l^{23} = 0,96;$$

$$l^{14} = 0,25.$$

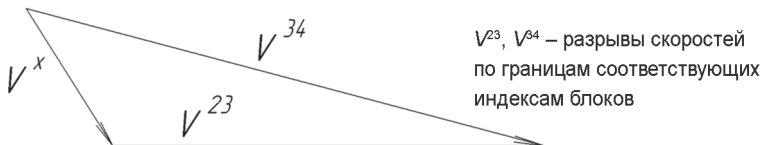


Рис. 4. Изменение плана скоростей при условии  $V_1 = 2V_2$

Fig. 4. Changing the speed plan under the condition  $V_1 = 2V_2$

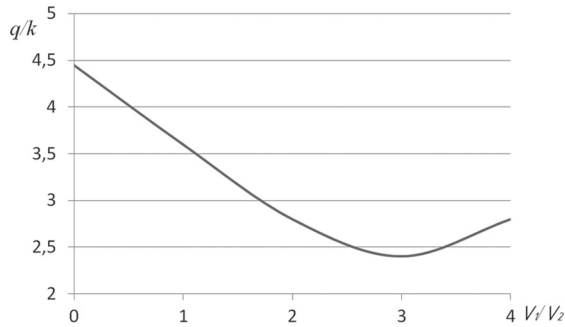


Рис. 5. Изменение давления  $q$  на рабочие поверхности агрегата от  $V_1/V_2$   
 Fig. 5. Change in pressure  $q$  on the working surfaces of the unit from  $V_1/V_2$

Используя выражение (6) для несимметричного предложенного поля линий скольжения давление на рабочие поверхности агрегата будет равно

$$\frac{q}{k} = \frac{1}{2} \sum_i v_i l_i = \frac{1}{2} (V^{12} \times l^{12} + V^{23} \times l^{23} + V^{34} \times l^{34} + V^{14} \times l^{14}) = 4,45$$

В предлагаемом измельчителе-классификаторе необходим индивидуальный привод как для вала-измельчителя, так и для перфорированного барабана; это позволит осуществлять изменение скоростей  $V_1$  и  $V_2$ .

Если  $V_1 = 2V_2$ , то полученная результирующая скорость потока  $V^x$  измельчаемого материала на разрыве блоков 1 и 2 изменит свое направление (рис. 4).

При дальнейшем увеличении скорости  $V_1$  относительно скорости  $V_2$  результирующая скорость  $V^x$  на разрыве блоков измельчаемого материала может

совпасть с вектором максимальных касательных напряжений, что существенно снизит контактное давление и, как следствие, затраты энергии на разрушение (рис. 5).

### Экспериментальное исследование

Теоретическое исследование позволило выявить влияние скоростей вращения рабочих органов на силовые параметры и, следовательно, на эффективность переработки материалов измельчителем-классификатором [19, 20]. В тоже время теоретическая модель ввиду своих ограничений не дает возможность оценить в полной мере процесс измельчения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, поэтому для проверки полученных закономерностей проводились лабораторные испытания. Лабораторная установка (рис. 6) имеет основание 1, на котором на роликах 3 устанавливается барабан 2 с располо-

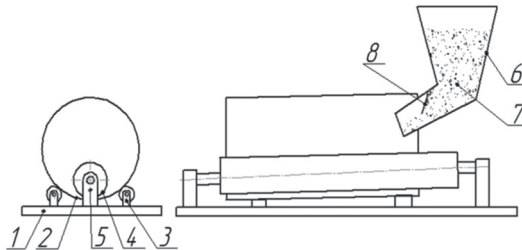


Рис. 6. Конструкция лабораторной установки  
 Fig. 6. Design of the laboratory setup



женным внутри него валом-измельчителем 4. Регулируемые опоры 5 позволяют изменять зазор между валом-измельчителем и барабаном. Для отвода готового продукта в барабане 2 имеются перфорации соответствующего размера. Регулирование потока исходного материала 7 производилось дозатором 6 посредством поворота заслонки 8.

При проведении экспериментальных исследований использовался гипс Г2 ГОСТ 125-2018, из которого в соответствии с технологией приготовления формировался брикет. Далее он подвергался дроблению и классификации с помощью сит, после чего формировался исходный продукт, в составе которого были частицы с размерами от 4 до 1 мм. Объем исходного продукта 0,02 м<sup>3</sup>, время его переработки за три прохода остатка в среднем 42 мин, эксперимент повторялся 10 раз для установленного зазора. Затраты энергии на обработку пробы по результатам эксперимента составили от 0,36 до 0,63 кВт·ч. Размер частиц готового продукта 0,3 мм.

Для оценки эффективности  $\mathcal{E}$  исследуемого процесса необходимо учиты-

вать полную производительность  $Q_n$ , с учетом объемной производительности  $Q_o$  и производительности по готовому продукту  $Q_r$  в %:

$$Q_n = Q_o \cdot Q_r / 100.$$

Кроме того, на эффективность процесса влияет размер рабочих поверхностей агрегата. Для учета этого параметра рассчитывалась удельная мощность разрушения  $\Delta W$  как отношение мощности  $W$ , необходимой на измельчение (измерялась лабораторным ваттметром РСЕ-360), к квадрату диаметра рабочего органа  $d$ :

$$\Delta W = W / d^2.$$

Таким образом, можно оценить эффективность переработки породы  $\mathcal{E}$  как отношение удельной мощности  $\Delta W$  к полной производительности процесса  $Q_n$ :

$$\mathcal{E} = \Delta W / Q_n.$$

Результаты эмпирического исследования показаны на рис. 7.

Результаты эмпирического исследования показали, что повысить эффективность измельчения можно за счет изменения отношения скоростей  $V_1 / V_2$  и

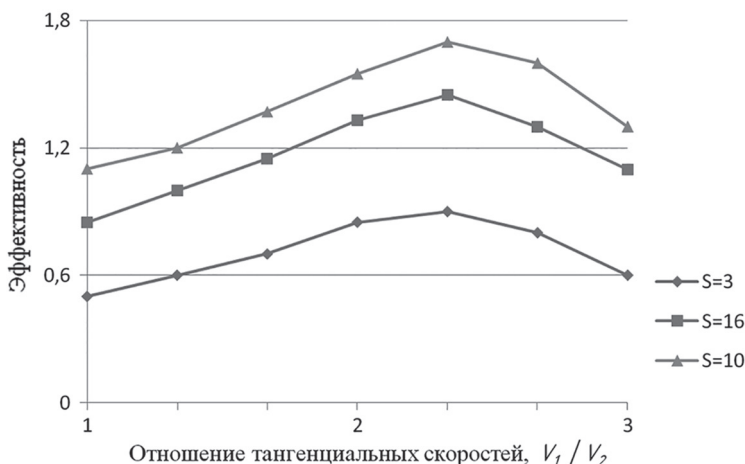


Рис. 7. Результаты эмпирического исследования эффективности измельчения  $\mathcal{E}$  от  $V_1 / V_2$  при изменении технологического зазора  $s$  (мм) между корпусом барабана и валом-измельчителем

Fig. 7. Results of the empirical study of the grinding efficiency  $\mathcal{E}$  from  $V_1 / V_2$  changing the technological gap  $s$  (mm) between the drum body and the grinding shaft

изменения технологического зазора  $s$ . Наивысшая эффективность измельчения (возрастает на 30%) при  $V_1/V_2 = 2,3$  и технологическом зазоре  $s$  между валом-измельчителем и перфорированным барабаном 10 мм. При технологическом зазоре 3 мм повышается выход готового продукта (растет  $Q_r$ ), но при этом увеличиваются затраты энергии на измельчение. При технологическом зазоре 16 мм уменьшается выход готового продукта  $Q_r$  при некотором снижении затрат энергии на измельчение.

### Выводы

Предложена теоретическая модель, полученная на основе энергетического метода расчета, которая позволяет осу-

ществлять теоретический анализ процесса разрушения горных пород, обладающих пластическими свойствами, что обеспечивает при проектировании измельчительного оборудования выявление наиболее эффективных параметров рабочих поверхностей агрегатов, а также режимов переработки.

Экспериментальные испытания на лабораторной установке показали, что для достижения наивысшей эффективности процесса измельчения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, необходимо проводить дополнительные исследования в зоне оптимальных параметров разрушения для уточнения технологических режимов переработки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алванян А. К., Алванян К. А. Физико-механические свойства гипсового камня и инженерно-геологические условия Селищенского месторождения строительного гипса // Вестник Пермского университета. Геология. — 2019. — Т. 18. — № 4. — С. 386–393. DOI: 10.17072/psu.geol.18.4.386.
2. Ибламинов Р. Г., Алванян А. К. Региональная минералогия общераспространенных полезных ископаемых (на примере Пермского края): монография. — Пермь, 2018. — 120 с.
3. Жуковский Ю. Л., Королев Н. А., Малькова Я. М. Мониторинг состояния измельчения в барабанных мельницах по результирующему моменту на валу // Записки Горного института. — 2022. — Т. 256. — С. 686–700. DOI: 10.31897/PMI.2022.91.
4. Дмитрак Ю. В., Атрушкевич В. А., Кубрин С. С., Адамова Л. С. Определение энергии ударных импульсов в процессе измельчения горных пород для мельниц различных типов // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 468–478. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-468-478.
5. Абрамкин Н. И., Мансуров П. А., Кузина А. В., Левкин Ю. М. Обоснование параметров расчета валковой дробилки с учетом применения шпальтовых просеивающих поверхностей // Устойчивое развитие горных территорий. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 473–481. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-473-481.
6. Власенко Д. А. Уточненная методика определения энергосиловых параметров процесса измельчения в валковых дробилках // Вестник Донецкого национального технического университета. — 2020. — № 3 (21). — С. 3–9.
7. Камалян Р. З., Камалян С. Р., Нестерова Н. С. О физических процессах и некоторых экспериментальных результатах разрушения горных пород // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. — 2023. — № 3. — С. 15–22. DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.53.77.002.
8. Хопунов Э. А. Формализация факторов управляемого разрушения в процессах рудоподготовки // Современные научные исследования и инновации. — 2020. — № 1 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2020/01/91114>: (дата обращения: 09.07.2024).
9. Ракишев Б. Р., Кушпанов М. С. Удельные энергозатраты при различных уровнях дробления горных пород // Записки Горного института. — 2001. — Т. 148. — № 1. — С. 150–153.
10. Жабко А. В. Условие прочности горных пород // Известия Уральского государственного горного университета. — 2014. — № 4 (36). — С. 24–28.

11. Жабко А. В. Теоретические и экспериментальные аспекты пластического деформирования и разрушения горных пород // Известия Уральского государственного горного университета. — 2018. — № 1(49). — С. 68–79. DOI: 10.21440/2307-2091-2018-1-68-79.
12. Кобелева Н. Н. Методические особенности построения прогнозных математических моделей для изучения деформаций высоких плотин // Вестник СГУГиТ. — 2017. — Т. 22. — № 2. — С. 55–66.
13. Рахимова М. Х., Сайидкасимов С. С., Иногамов И. И., Якубов Т. Ш. Построение зависимостей параметров предельного откоса дамб хвостохранилищ МОФ АГМК при помощи программного обеспечения // Горный вестник Узбекистана. — 2020. — № 4 (83). — С. 78–83.
14. Яковлев В. Н. Контроль и оценка устойчивости откосов дамб хвостохранилищ по результатам маркшейдерских наблюдений. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Екатеринбург, 2002. — 23 с.
15. Беляев С. В. Статика и геометрия асимметричного очага деформации при совмещенной прокатке-прессовании // Научная жизнь. — 2008. — № 4. — С. 14–20.
16. Козловский Е. Я., Журавков М. А. Определение и верификация параметров расчетной модели соляных пород с учетом разупрочнения и ползучести // Записки Горного института. — 2021. — Т. 247. — С. 33–38. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.4.
17. Маковкин Г. А., Лихачева С. Ю. Применение МКЭ к решению задач механики деформируемого твердого тела. Ч. 1. — Н. Новгород, 2012. — 73 с.
18. Жабко А. В. Прочность континуума (твердых тел) // Известия вузов. Горный журнал. 2017. — № 4. — С. 47–55.
19. Горлов И. В., Митусов П. Е., Беляев А. М. Анализ процесса измельчения слабых горных пород // Уголь. — 2022. — № 6. — С. 44–47.
20. Горлов И. В., Митусов П. Е. Моделирование процесса разрушения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. — 2023. — № 4 (20). — С. 26–36. **PLAB**

## REFERENCES

1. Alvanian A. K., Alvanian K. A. Physical and Mechanical Properties of Gypsum stone. Engineering and Geological Conditions of Selishchenskoe Deposit of Construction Gypsum. *Bulletin of Perm University. Geology*. 2019, vol. 18, no. 4, pp. 386–393. [In Russ]. DOI: 10.17072/psu.geol.18.4.386.
2. Iblaminov R. G., Alvanyan A. K. *Regional'naya minerageniya obshcherasprostranennykh poleznykh iskopayemykh (na primere Permskogo kraya), monografiya* [Regional minerageny of common useful minerals (using the example of the Perm region): monograph], Perm, 2018, 120 p.
3. Zhukovsky Yu. L., Korolev N. A., Malkova Ya. M. Monitoring the state of grinding in drum mills by the resulting torque on the shaft. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 256, pp. 686–700. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.91.
4. Dmitrak Yu. V., Atrushkevich V. A., Kubrin S. S., Adamova L. S. Determination of the energy of shock pulses in the process of grinding rocks for mills of various types. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 3, pp. 468–478. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-468-478.
5. Abramkin N. I., Mansurov P. A., Kuzina A. V., Levkin Yu. M. Justification of the parameters for calculating a roll crusher taking into account the use of sleeper screening surfaces. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 2, pp. 473–481. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-473-481.
6. Vlasenko D. A. A refined method for determining the energy-power parameters of the grinding process in roller crushers. *Bulletin of the Donetsk National Technical University*. 2020, no. 3 (21), pp. 3–9. [In Russ].
7. Kamalyan R. Z., Kamalyan S. R., Nesterova N. S. On physical processes and some experimental results of rock destruction. *Bulletin of Scientific center VostNII for industrial and environmental safety*. 2023, no. 3, pp. 15–22. [In Russ]. DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.53.77.002.
8. Khopunov E. A. Formalization of controlled destruction factors in ore preparation processes. *Modern scientific researches and innovations*. 2020, no. 1. [In Russ], available at: <https://web.snauka.ru/issues/2020/01/91114>: (accessed 09.07.2024).
9. Rakishev B. R., Kushpanov M. S. Specific energy consumption at different levels of rock crushing. *Journal of Mining Institute*. 2001, vol. 148, no. 1, pp. 150–153. [In Russ].

10. Zhabko A. V. Conditions for the strength of rocks. *News of the Ural State Mining University*. 2014, no. 4 (36), pp. 24–28. [In Russ].
11. Zhabko A. V. Theoretical and experimental aspects of plastic deformation and destruction of rocks. *News of the Ural State Mining University*. 2018, no. 1(49), pp. 68–79. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2018-1-68-79.
12. Kobeleva N. N. Methodological features of constructing predictive mathematical models for studying deformations of high dams. *Vestnik SSUGT*. 2017, vol. 22, no. 2, pp. 55–66. [In Russ].
13. Rakhimova M. Kh., Sayidkasimov S. S., Inogamov I. I., Yakubov T. Sh. Construction of dependencies of the parameters of the maximum slope of tailings dams of the AGMK plant using software. *Mining Bulletin of Uzbekistan*. 2020, no. 4 (83), pp. 78–83. [In Russ].
14. Yakovlev V. N. *Kontrol' i otsenka ustoychivosti otkosov damb khvostokhranilishch po rezul'tatam marksheyderskikh nablyudeniy* [Control and assessment of the stability of slopes of tailings dams based on the results of surveying observations], Candidate's thesis, Ekaterinburg, 2002, 23 p.
15. Belyaev S. V. Statics and geometry of an asymmetric deformation zone during combined rolling-pressing. *Nauchnaya zhizn'*. 2008, no. 4, pp. 14–20. [In Russ].
16. Kozlovsky E. Ya., Zhuravkov M. A. Definition and verification of parameters of the calculation model of salt rocks taking into account softening and creep. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 247, pp. 33–38. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.4.
17. Makovkin G. A., Likhacheva S. Yu. *Primenenie MKE k resheniyu zadach mekhaniki deformiruemogo tverdogo tela*. Ch. 1 [Application of FEM to solving problems of mechanics of deformable solids. Part 1], N. Novgorod, 2012, 73 p.
18. Zhabko A. V. Strength of the continuum (solids). *Minerals and Mining Engineering*. 2017, no. 4, pp. 47–55. [In Russ].
19. Gorlov I. V., Mitusov P. E., Belyaev A. M. Analysis of the process of grinding weak rocks. *Ugol'*. 2022, no. 6, pp. 44–47. [In Russ].
20. Gorlov I. V., Mitusov P. E. Modeling the process of destruction of weak rocks with plastic properties. *Vestnik of Tver state technical university. Series «Technical science»*. 2023, no. 4 (20), pp. 26–36. [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горлов Игорь Васильевич — д-р техн. наук, доцент,  
Тверской государственный технический университет,  
e-mail: gorloviv@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-4274-402X,

Митусов Павел Евгеньевич — канд. техн. наук,  
Московский научно-исследовательский проектно-изыскательский  
институт технологий и инноваций, e-mail: pmitusov@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-5045-3310.

**Для контактов:** Горлов И.В., e-mail: gorloviv@yandex.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I. V. Gorlov, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,  
Tver State Technical University, 170026, Tver, Russia,  
e-mail: gorloviv@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-4274-402X,

P. E. Mitusov, Cand. Sci. (Eng.), Moscow Research Design  
and Survey Institute of Technology and Innovation,  
117105, Moscow, Russia, e-mail: pmitusov@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-5045-3310.

**Corresponding author:** I. V. Gorlov, e-mail: gorloviv@yandex.ru.

Получена редакцией 29.10.2024; получена после рецензии 25.12.2024; принята к печати 10.03.2025.  
Received by the editors 29.10.2024; received after the review 25.12.2024; accepted for printing 10.03.2025.