

# НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГОРНЫЕ НАУКИ

УДК 622.73

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ СЛАБЫХ ГОРНЫХ ПОРОД, ОБЛАДАЮЩИХ ПЛАСТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

И.В. ГОРЛОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, П.Е. МИТУСОВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup>Тверской государственный технический университет,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: gorloviv@yandex.ru

<sup>2</sup>Московский научно-исследовательский проектно-изыскательский институт  
технологий и инноваций, 117105, Москва, Нагатинский 1-й пр., 4

© Горлов И.В., Митусов П.Е., 2023

Предложен новый подход к анализу разрушения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами. Представлен обзор основных теорий разрушения горных пород. Проведен анализ типовых методов измельчения и классификации горных пород. Обоснована необходимость проектирования нового оборудования для переработки слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами. Отмечено, что данное оборудование обеспечивает одновременное измельчение и классификацию слабых горных пород. Предложена конструкция измельчителя-классификатора, описан принцип его действия, а также основы инженерных расчетов его параметров.

*Ключевые слова:* энергетический метод, поля линий скольжения, сдвиговые напряжения, вал-измельчитель, перфорированный барабан, тангенциальные скорости.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2023-4-26-36**

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие горной промышленности невозможно без совершенствования процессов добычи и переработки полезных ископаемых. В то же время не всегда уделяется внимание особенностям переработки горных пород средней и слабой прочности, обладающих повышенными пластическими свойствами (это такие породы, как тальк, мел, гипс, слабые известняки и др.) [1]. При использовании типового оборудования для измельчения и классификации слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, эффективность таких процессов существенно уменьшается. Например, при измельчении в барабанных шаровых мельницах каолиновых глин эффективность процесса снижается примерно на 40 % по сравнению с измельчением пород, обладающих ограниченными пластическими свойствами.

В настоящее время в подавляющем большинстве случаев на перерабатывающих предприятиях для измельчения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, применяется традиционное оборудование [2]. При использовании типовых способов разрушения пород оно способствует решению широкого круга задач, и это приводит к низкой эффективности процесса из-за высокой металлоемкости конструкций с завышенными мощностями. Специализированное оборудование, которое требуется применять для измельчения пластичных материалов, практически не выпускается.

Для переработки пластичных горных пород слабой прочности нужно разрабатывать оборудование с учетом свойств таких материалов, что невозможно без теоретического анализа на уровне модели процесса.

### ОСНОВНЫЕ ТЕОРИИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

На сегодняшний день не существует решений, которые позволяют с необходимой точностью оценивать параметры процесса разрушения горных пород, обладающих высокой пластичностью, с точки зрения их изначального состояния, количества и качества получаемого продукта, а также соответствующего энергопотребления [3].

Еще в XIX веке у ученых возникали предположения о том, что энергия, затрачиваемая на измельчение, зависит от разницы площадей частиц конечного и исходного состояний (гипотеза Риттингера) [4]:

$$A = k\Delta S,$$

где  $A$  – работа, затрачиваемая на измельчение горной породы;  $k$  – коэффициент, полученный на основе экспериментальных исследований для соответствующей горной породы;  $\Delta S$  – разность площадей частиц в конечном и исходном состояниях.

В конце XIX века, в 1874 году, сначала В.Л. Кирпичев, а потом и Ф. Кик на основе проведенных исследований предположили, что на работу, необходимую для измельчения, влияют также предел прочности на сжатие рассматриваемой горной породы и объем ее разрушения.

В изложении Л.Б. Левенсона выражение принимает вид

$$A = \frac{\sigma_{сж}^2 V_0}{2E},$$

где  $A$  – работа, затрачиваемая на измельчение;  $\sigma_{сж}$  – предел прочности на сжатие горной породы;  $V_0$  – изначальный объем материала;  $E$  – модуль упругости для рассматриваемой горной породы.

Позднее было установлено, что гипотезу Кирпичева – Кика лучше использовать при дроблении крупных кусков горной породы, а гипотезу Риттингера – в случае измельчения более мелких частиц.

В 1951 году Ф. Бонд предложил новую гипотезу. На основе цикла эмпирических исследований было предложено выражение

$$A = k \left( \frac{1}{\sqrt{d_{cp}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{cp}}} \right) G,$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, полученный эмпирически;  $D_{cp}$  и  $d_{cp}$  – усредненная крупность частиц горной породы до измельчения и после него;  $G$  – количество измельчаемой горной породы.

На основе дальнейших исследований А.К. Рундквист в 1956 году предложил общее выражение, где степень  $n$  для каждого размера частицы определялась с помощью эксперимента. Выражение имеет вид

$$A = k_p \frac{i^{n-1}}{D_{cp}^{n-1}} G,$$

где  $A$  – работа, затрачиваемая на измельчение;  $k_p$  – эмпирический коэффициент, отвечающий за пропорциональность;  $i$  – требуемая степень измельчения;  $D_{cp}$  –

усредненная крупность частиц горной породы до измельчения;  $G$  – количество измельчаемой горной породы.

Одновременно П. Ребиндер предложил новый подход, при котором работа на измельчение расходуется как на деформацию самого материала, так и на получение новых поверхностей, образуемых при измельчении частиц. Таким образом, в нем объединены гипотезы Кирпичева – Кика и Риттингера:

$$A = k_v V + k_s \Delta S,$$

где  $k_v$  и  $k_s$  – эмпирические коэффициенты пропорциональности;  $V$  – объем деформируемого материала;  $\Delta S$  – прирост площадей вновь сформированных поверхностей.

Используя предложенный П. Ребиндером подход, В. Елисеев предложил измененную зависимость для определения затрачиваемой при измельчении работы:

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

где  $S_k$  – площадь поверхности частиц после измельчения;  $S_0$  – площадь поверхности частиц до измельчения;  $B$  и  $C$  – экспериментальные коэффициенты.

Многими исследователями было установлено, что по мере измельчения частиц растет сопротивление разрушению вследствие масштабных факторов. Для большинства горных пород предел их прочности можно определить по выражению

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

где  $\sigma_0$  – предел прочности рассматриваемого материала, полученный на стандартном образце;  $x$  – величина частицы измельчаемой горной породы;  $k_1$  – поправочный коэффициент, который можно рассчитать по выражению

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

где  $\gamma$  – удельная поверхностная энергия;  $G$  – модуль сдвига для рассматриваемого материала;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

При изучении двух элементов горной породы с величинами частиц  $x$  и  $x - \Delta x$  изменение работы на разрушение можно вычислить по выражению

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

При расчетах с допустимой погрешностью для значений второго порядка (при условии приращения размера частиц как бесконечно малого) для выражения (1) запишем

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

Используя полученное выражение (2), оценим суммарный расход энергии для измельчения горной породы от исходного размера частицы  $D$  до  $d$ :

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

Используя выражение (3), для соответствующих размеров частиц горной породы, установим работу, затрачиваемую на измельчение:

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

Полученное выражение в основном отвечает рассмотренным гипотезам, однако все они не учитывают параметры нагружения при разрушении элементов породы.

Анализ представленных выражений показывает, что при любом этапе измельчения горных пород затраты энергии зависят от степени измельчения, при этом они кратно увеличиваются с уменьшением размера частиц менее миллиметра, что согласуется с экспериментальными данными (рис. 1).

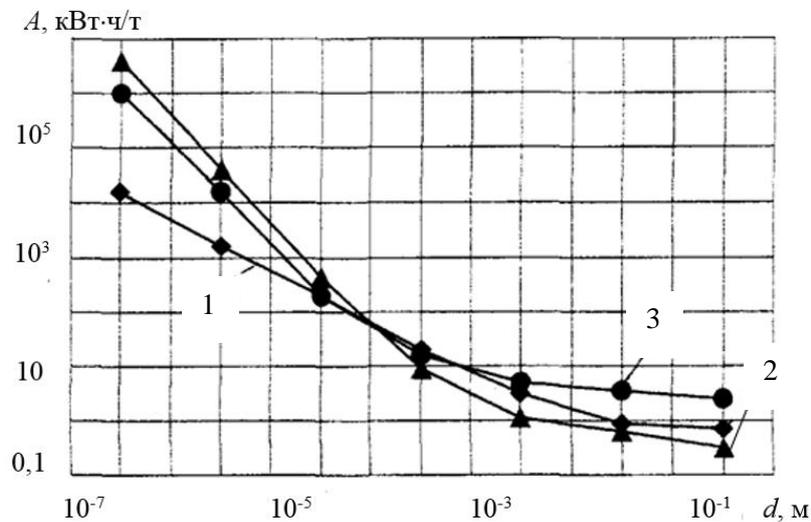


Рис. 1. Изменение затрачиваемой на измельчение энергии в зависимости от размера частиц  $d$ : 1 – кварц; 2 – апатит; 3 – кальцит [5]

Указанные выражения невозможно напрямую использовать, чтобы определить затраты энергии для широкого круга материалов, так как свойства последних существенно различаются. Таким образом, при изучении процесса измельчения в большинстве исследований основывались на эмпирических результатах, полученных для типовых агрегатов и материалов с конкретными свойствами. Энергопотребление процесса измельчения традиционно определялось проведением практических измерений расходуемой энергии, что не дает возможности выявить необходимые для повышения эффективности закономерности.

Рядом ученых проводились исследования пластических свойств горных пород [6]. На основе исследований были получены выражения и критерий, с помощью которых можно описать поверхности текучести и пластический потенциал при разрушении горных пород. Кроме того, было установлено, что присутствует полная аналогия предлагаемого критерия пластичности для горной породы с критериями Мора. Полученные зависимости могут применяться для оценки прочности горных пород при срезе на основе угла внутреннего трения и сцепления. Проведенные эмпирические исследования доказали правомерность применения предлагаемого

критерия пластичности для горных пород в условиях всестороннего сжатия. При достижении предельного состояния предлагаемые выражения имеют вид критерия пластичности Треска – Сен-Венана. Следовательно, при переработке обладающих пластическими свойствами слабых горных пород, которые находятся в условиях всестороннего сжатия при уплотнении, могут быть применены известные выражения, полученные для жесткого идеально-пластического материала. Таким образом, для предварительного анализа процесса измельчения слабых горных пород можно использовать приближенный энергетический метод.

Энергетический метод определения контактных напряжений основывается на экстремальных принципах теории пластичности. При этом действительные поля линий скольжения пластически деформируемого материала заменяются сравнительно простыми кинематически возможными полями, состоящими из жестких элементов – блоков, которые удовлетворяют граничным условиям по скоростям и перемещениям [7]. Поля линий скольжения и соответствующие планы скоростей представляют собой взаимные диаграммы Максвелла. Таким образом, для получения соответствующего плана скоростей допустимы методы графостатики.

### **АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ТИПОВЫХ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ И КЛАССИФИКАТОРОВ ГОРНЫХ ПОРОД**

На данный момент в горной промышленности применяют измельчители, в которых используются различные виды воздействия на породу: разламывающее и раскалывающее; раздавливающее и истирающе-раздавливающее; ударное и ударно-истирающее, а также измельчители коллоидного типа [3].

Классификация различных видов дробильно-измельчительных агрегатов по Э.А. Хопунову [4] основана на трех основных факторах: нагрузке, ее длительности, месте приложения (таблица).

Анализ факторов воздействия дробильно-измельчающего оборудования показывает, что существующие методы измельчения в большинстве случаев трудно оценить с точки зрения энергетических затрат. Так, например, при ударном или раздавливающем измельчении происходит истирание, оценить которое достаточно проблематично.

Классификация измельчительных машин по факторам воздействия

Аппарат	Параметры классификации по факторам разрушения										
	Нагрузка				Длительность			Место			
	жесткая	мягкая	циклическая	однократная	Спектр сил		квазистационарная	ударная	объемное	одиночное	истирание
					узкий	широкий					
Конусные, КМД	+				+		+			+	
Щековые	+		+		+		+				
Роторные		+			+		+			+	
Центробежные		+				+	+	+	+	+	
Инерционные, КИД		+	+		+		+		+	+	+
Валковые	+			+	+		+		+	+	
Барабанные		+		+		+	+			+	+

Анализ оборудования показал, что наиболее перспективными агрегатами для измельчения являются валковые прессы. Их конструкция аналогична валковой дробилке, но воздействие на породу разное, так как в валковых прессах разрушение в основном происходит при воздействии дробимых элементов друг на друга, что обеспечивает более эффективную передачу энергии для разрушения. Дробление в них осуществляется в закрытом пространстве и не позволяет частицам вырваться из зоны деформации. За счет этого обеспечиваются более высокая производительность и снижение степени износа оборудования по сравнению с машинами другого типа (рис. 2).

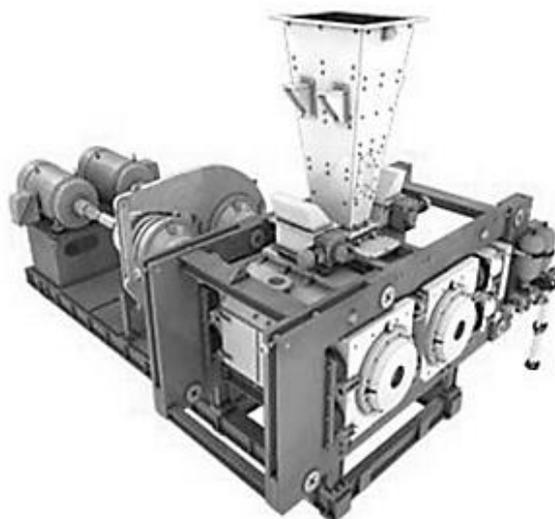


Рис. 2. Общий вид валкового прессы

Помимо вышеназванного, эффективность процесса измельчения значительно снижается при наличии в горной породе частиц, не нуждающихся в дальнейшем разрушении из-за своего размера. Соответственно, для повышения эффективности процесса измельчения в конструкции разрабатываемых устройств необходимо предусматривать возможность удаления таких частиц.

При измельчении горных пород получают продукт, который состоит из частиц различного размера. В дальнейшем их необходимо разделить на фракции с получением готового продукта, а несоответствующие фракции следует отправить на повторное измельчение. В горной промышленности применяют несколько видов классификации (гидравлическую, механическую, пневматическую, электрофизическую, электромагнитную и др.), которые используются для различных пород и реализуются разными типами агрегатов. Наиболее часто встречается механическая классификация, в ней продукт разделяется по размерам частиц с использованием калиброванных сит, решеток или колосников. Для этого применяются различные по конструкции грохоты, барабанные классификаторы и др.

Для устройств непрерывного действия с точки зрения производительности процесса грохочения наиболее перспективными являются барабанные грохоты (рис. 3). Они могут эффективно использоваться в классификации сыпучих материалов, в том числе и трудногрохотимых, обладающих пластическими свойствами.



Рис. 3. Общий вид барабанного грохота

Специалистами было установлено, что в барабанных грохотах повышение концентрации мелких частиц в исходном продукте снижает эффективность процесса классификации. Были представлены выражения, которые позволяют проводить теоретический анализ процесса классификации и выбирать рациональные режимы грохочения для барабанных классификаторов. Кроме того, установили, что при непрерывном режиме классификации интенсивность процесса снижается по мере перемещения породы от загрузочного окна к разгрузочному, причем концентрация мелких частиц увеличивается в области, близкой к центру циркуляции.

Энергозатраты на классификацию в барабанных грохотах достаточно велики, следовательно, для сокращения суммарных затрат на измельчение и классификацию необходимо разработать конструкцию измельчителя-классификатора с возможностью совмещения обоих процессов, так как при параллельном их протекании за счет синергии энергоэффективность комбинированного процесса получения готового продукта будет более высокой.

### **РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ-КЛАССИФИКАТОРА**

На основе анализа типового дробильно-сортировочного оборудования была разработана принципиально новая конструкция измельчителя-классификатора [8]. Данное конструкторское решение дает возможность совместить процессы измельчения и классификации в одном агрегате, минуя конвейерную перегрузку. Принцип воздействия на измельчаемый материал и технологические особенности данного агрегата позволяют применять его для измельчения слабых горных пород.

Если с помощью энергетического метода проводить анализ расчета происходящего внутри барабана мельницы дробления рабочим органом в виде вала-измельчителя, то необходимо разработать расчетную модель процесса, соответствующую условиям деформации измельчаемого материала. Для реализации процесса измельчения слабых горных пород могут использоваться различные типовые устройства. В то же время известно, что при измельчении горных пород, обладающих пластическими свойствами, эффективность типовых устройств невысокая [3]. Чтобы повысить эффективность этого процесса, предлагается новое устройство, которое представляет собой перфорированный барабан с валом-измельчителем внутри [8]. Схема рабочей зоны данного устройства показана на рис. 4.

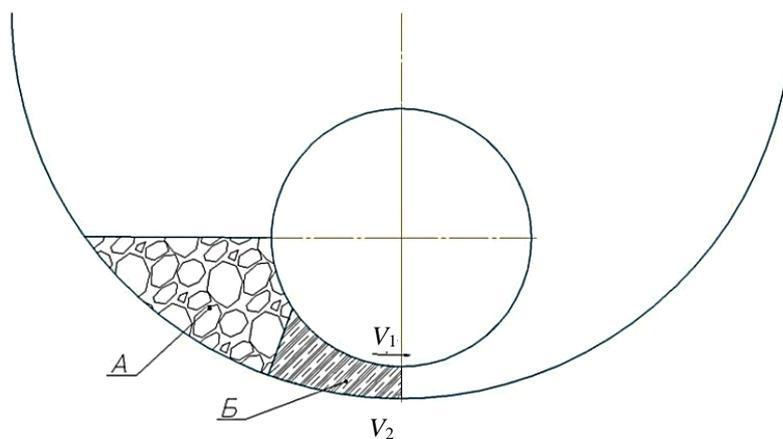


Рис. 4. Схема рабочей зоны устройства для измельчения:  
 $V_1$  – направление тангенциальной скорости вала-измельчителя;  
 $V_2$  – направление тангенциальной скорости барабана;  
 А – зона предварительного уплотнения породы;  
 Б – зона непосредственного разрушения

Процесс измельчения проходит в два этапа. На первом уплотняется измельчаемая масса до момента заполнения мелкими фракциями пустот между отдельными крупными элементами. При этом происходит частичная деформация менее прочных частиц. Данный этап требует сравнительно невысоких затрат энергии, поэтому при моделировании он не будет учитываться. На втором этапе (в зоне Б) уплотненная горная порода подвергается интенсивной пластической деформации. Для анализа давления на контактных поверхностях измельчительного агрегата будем использовать энергетический метод. Мощность, обеспечивающая такую схему деформации, несколько превышает действительную мощность внутренних сил при пластическом формоизменении. Таким образом, давления, полученные на основе данного метода, будут являться верхней оценкой их действительного значения. Процесс измельчения горной породы, обладающей пластическими свойствами в зоне Б, имеет некоторую аналогию с прокаткой листового металла между двумя валками, следовательно, для анализа пластической деформации можно использовать известную зависимость, полученную для плоской задачи [7]:

$$\frac{q}{2k} = \frac{\sum_i^1 v_i l_i + 2\mu \sum_j^1 v_j l_j}{2}, \quad (4)$$

где  $k$  – предел прочности на сдвиг;  $v_i, v_j, l_i, l_j$  – разрывы скоростей и длины линий скольжения между блоками;  $\mu$  – коэффициент трения между породой и рабочими поверхностями агрегата.

На рис. 5 представлена схема кинематически возможного поля линий скольжения, состоящая из треугольных блоков и позволяющая определить удельные усилия на втором этапе измельчения. По уравнению (4) при отсутствии проскальзывания материала можно определить для предложенного возможного поля линий скольжения величину контактного давления  $q$  на рабочую поверхность вала-измельчителя:

$$q / 2k = 0,5 \sum_i^1 v_i l_i. \quad (5)$$

Для принятого поля линий скольжения графоаналитически определены величины  $v_i$  и  $l_i$ :

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

$$l^{12} = 0,25; l^{34} = 0,99; l^{23} = 0,96; l^{14} = 0,25.$$

По выражению (5), с учетом несимметричного вида принятого поля линий скольжения, давление будет выражено соотношением

$$q/k = \frac{1}{2} \sum_i v_i l_i = 0,5(V^{12} \times l^{12} + V^{23} \times l^{23} + V^{34} \times l^{34} + V^{14} \times l^{14}) = 4,45.$$

Рассматриваемый измельчитель-классификатор должен иметь индивидуальный привод вала-измельчителя и перфорированного барабана, что позволит регулировать скорости  $V_1$  и  $V_2$ .

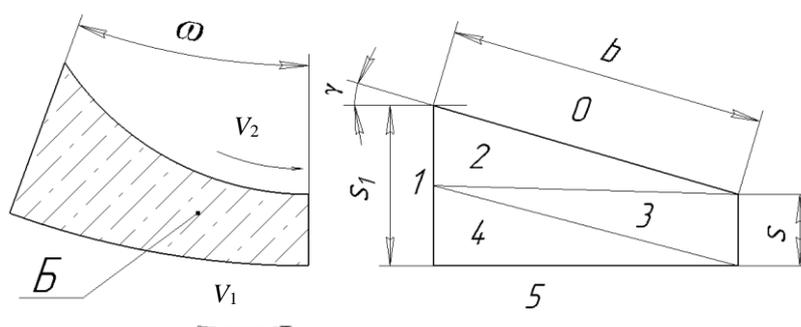


Рис. 5. Схема поля линий скольжения в зоне  $B$ : 1–5 – блоки;  $\omega$  – угловая скорость рабочих поверхностей;  $\gamma$  – угол захвата материала;  $b$  – протяженность зоны деформации;  $S_1, S$  – зазор на входе и выходе из зоны  $B$

Если скорость  $V_1$  увеличивать, то будут изменяться величины разрывов скоростей и, следовательно, давление на рабочие поверхности вала-измельчителя и перфорированного барабана. Зависимость контактного давления от отношения  $V_1/V_2$  представлена на рис. 6.

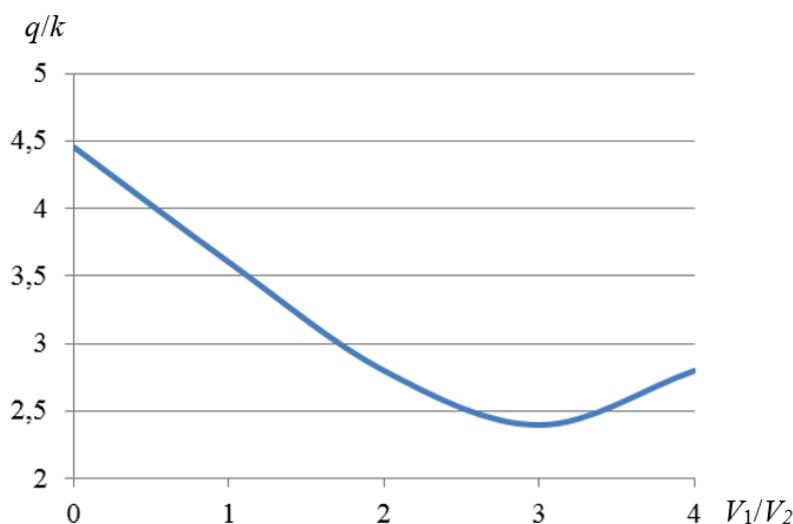


Рис. 6. Зависимость контактного давления  $q$  на рабочую поверхность вала-измельчителя от  $V_1/V_2$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная модель пластической деформации позволит провести теоретическое исследование процесса измельчения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, что даст возможность на этапе проектирования измельчителя-классификатора установить рациональные параметры агрегата и определить необходимые режимы эксплуатации, которые обеспечат достаточно высокую эффективность процесса переработки [9]. Предложенный подход на основе анализа предлагаемой теоретической модели обеспечит на стадии проектирования выявление наиболее значимых закономерностей данного процесса. Анализ результатов теоретического исследования показал, что при соотношении скоростей  $V_1/V_2$  около 3 давление на рабочие поверхности агрегата может снизиться почти в 2 раза, что существенно сократит затраты энергии на измельчение. Теоретическая модель, основанная на энергетическом методе расчета контактных давлений, позволит установить наиболее эффективные параметры рабочих органов и режимов работы агрегата для обеспечения потребной производительности в соответствии с исходными параметрами измельчаемой горной породы. В процессе проектирования измельчительного оборудования это приведет к принятию наиболее эффективных решений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алванян А.К., Алванян К.А. Физико-механические свойства гипсового камня и инженерно-геологические условия Селищенского месторождения строительного гипса // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология*. 2019. Т. 18. № 4. С. 386–393.
2. Авдохин В.М. Обогащение углей: учебник для вузов: в 2 т. М.: Горная книга. 2012. Т. 1. Процессы и машины. 420 с.
3. Донченко А.С., Донченко В.А. Справочник механика рудообогатительной фабрики. М.: Недра. 1986. 543 с.
4. Гальперин А.М. Геомеханика открытых горных работ: учебник для вузов. М.: Изд-во Московского государственного горного университета. 2003. 473 с.
5. Ракишев Б.Р., Кушпанов М.С. Удельные энергозатраты при различных уровнях дробления горных пород // *Записки Горного института*. 2001. Т. 148. № 1. С. 150–153.
6. Жабко А.В. Условие прочности горных пород // *Известия Уральского государственного горного университета*. 2014. № 4 (36). С. 24–28.
7. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов. М.: Металлургия. 1972. 408.
8. Разработка конструкции измельчителя-классификатора для переработки слабых горных пород / П.Я. Бибииков [и др.] // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015. № 3. С. 233–237.
9. Горлов И.В. Анализ результатов эмпирического исследования пластического деформирования при восстановлении деталей торфяных машин // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 2 (6). С. 71–78.

**Для цитирования:** 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.

# **SIMULATION OF THE PROCESS OF DESTRUCTION OF WEAK ROCKS WITH PLASTIC PROPERTIES**

I.V. GORLOV<sup>1</sup>, Dr. Sc., P.E. MITUSOV<sup>2</sup>, Cand. Sc.

<sup>1</sup>Tver State Technical University,  
22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver, Russian Federation, e-mail: gorloviv@yandex.ru

<sup>2</sup>Moscow Research and Development Institute of Technology and Innovation,  
4, Nagatinsky 1st pr., 117105, Moscow, Russian Federation

A new approach to analysing the fracture of weak rocks with plastic properties is proposed. A review of the main theories of rock fracture is presented. Typical methods of crushing and classification of rocks are analysed. The necessity of designing new equipment for processing of weak rocks with plastic properties is substantiated. It is noted that this equipment provides simultaneous crushing and classification of weak rocks. The design of the shredder-classifier is proposed, the principle of its operation is described, as well as the basics of engineering calculations of its parameters.

*Keywords:* energy method, fields of slip lines, shear stresses, chopper shaft, perforated drum, tangential velocities.

Поступила в редакцию/received: 23.06.2023; после рецензирования/revised: 28.06.2023;  
принята/accepted: 07.07.2023

УДК 621.879.3:658.5

## **ОБОСНОВАНИЕ ПРИОРИТЕТНОСТИ РЕМОНТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПАРКА ЭКСКАВАТОРОВ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК СЛАБОФОРМАЛИЗУЕМЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ**

С.В. ДОРОНИН, канд. техн. наук, А.А. АЛЬШАНСКАЯ, асп.

Сибирский федеральный университет, 660025, г. Красноярск,  
пр-т Красноярский рабочий, 95, e-mail: alshanskaya\_anna@inbox.ru

© Доронин С.В., Альшанская А.А., 2023

Дано обоснование приоритетности ремонтного обслуживания парка экскаваторов на горных предприятиях на основе оценки влияния на надежность машин большого числа факторов различной природы. Для формализации закономерностей формирования отказов под влиянием качественно описываемых эксплуатационных факторов получены экспертные знания путем анкетирования специалистов горных предприятий. На основании мониторинга значений эксплуатационных факторов выполнена формализованная оценка интегрального коэффициента их влияния на надежность. Предложено ранжирование парка машин по значениям интегрального коэффициента влияния.

*Ключевые слова:* парк экскаваторов, надежность, экспертные оценки, ремонтные воздействия.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2023-4-36-45**

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 4 (20), 2023*