

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СЛАБЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

И.В. ГОРЛОВ¹, д-р техн. наук, П.Е. МИТУСОВ²

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

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

© Горлов И.В., Митусов П.Е., 2022

Проанализированы различные способы разрушения горных пород для наиболее распространенных горных машин. Описаны основы процесса разрушения слабых горных пород и их влияние на энергоэффективность разрушения. Обоснована потребность в разработке нового типа измельчительного оборудования, которое может использоваться для одновременного разрушения и классификации слабых горных пород. Представлена конструкция измельчителя-классификатора, дано его описание, а также изложен принцип действия и основы инженерных расчетов параметров.

Ключевые слова: измельчитель-классификатор, поля линий скольжения, сдвиговые напряжения, вал-измельчитель, перфорированный барабан, разные окружные скорости.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-1-57-65

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время исследователи не уделяют должного внимания особенностям процесса измельчения горных пород средней и слабой прочности. К таким породам относятся тальк, мел, гипс, слабые известняки и др. [1]. На большинстве перерабатывающих предприятий для измельчения горных пород используется типовое оборудование, такое как конусные и валковые дробилки для среднего дробления, шаровые барабанные мельницы для более тонкого измельчения [2, 3]. Это оборудование спроектировано под достаточно широкий круг задач, но при этом в нем применяются традиционные принципы измельчения горных пород, что в некоторых случаях приводит к высокой металлоемкости конструкций, завышенным мощностям, обеспечивающим переработку широкого спектра материалов (как по показателям прочности, так и по структурным свойствам). Специализированное оборудование, предназначенное для дробления и измельчения материалов средней и слабой прочности, практически не выпускается.

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ТИПОВЫХ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ ГОРНЫХ ПОРОД

В промышленности используются измельчители с различными видами воздействия на горную породу: раскалывающего и разламывающего действия; истирающе-раздавливающего и раздавливающего действия; ударно-истирающего и ударного действия; коллоидные [4].

К устройствам раскалывающе-разламывающего и раздавливающего действия можно отнести щековые, валковые и молотковые дробилки, в которых разрушение материала происходит в результате одноосного нагружения породы между рабочими элементами машины (щеками, конусами, валками) либо используется способ

соударения куска и рабочих органов (молотковые и роторные дробилки). При дроблении такими машинами деформация отдельного куска породы доводится до размеров, обусловленных требованием к конечному продукту, после чего начинается процесс прессования массива из образовавшихся осколков. При этом происходит заполнение пустот между отдельными тонкодисперсными частицами. В случае такого воздействия на породу ее разрушение происходит неселективно.

В конусных дробилках и роллер-прессах реализуется более рациональный способ селективного разрушения в слое породы, при котором куски измельчаемого материала воздействуют друг на друга, что обеспечивает дополнительные небольшие и однонаправленные перемещения. Однако это приводит к тому, что образовавшиеся тонкодисперсные частицы заполняют пустоты между оставшимися крупными кусками и препятствуют дальнейшему их разрушению.

Анализ рассмотренных схем дробильно-измельчающего оборудования показывает, что представленные способы измельчения, как правило, сопровождаются процессами, которые трудно поддаются оценке энергетических затрат. Например, при раздавливающем или ударном измельчении происходит одновременно и истирание, но оценить его достаточно сложно.

Большинство современных измельчителей производится с двигателями высокой мощности, которые рассчитаны на дробление горных пород средней и высокой прочности. Следовательно, при измельчении слабых пород машина имеет избыточную мощность, что отрицательно влияет на энергоэффективность данного процесса. В случае с конусными дробилками средний коэффициент загрузки привода по мощности при разрушении горных пород средней и высокой прочности составляет 0,44, а в случае измельчения слабых материалов данный коэффициент снижается до 0,12...0,15.

В некоторых ситуациях затраты энергии на дробление слабых горных пород превышают в разы затраты энергии на разрушение пород средней и высокой прочности (например, барабанные шаровые мельницы). Так, при дроблении породы из кварца ($\sigma_{сж} = 400$ МПа) или корунда ($\sigma_{сж} = 500$ МПа) удельная энергия измельчения соответствует 45,5 и 52,4 кВт·ч/т, в то время как при измельчении талька ($\sigma_{сж} = 28$ МПа) или гипса ($\sigma_{сж} = 40$ МПа) – 111 и 125 кВт·ч/т.

В случае использования оборудования истирающе-раздавливающего действия, например бегунковых, валковых, катково-тарельчатых и других мельниц, энергоэффективность процесса дробления несколько возрастает. Процесс разрушения таких измельчителей происходит со значительным объемным уплотнением материала, что оказывает положительное влияние на взаимодействие частиц породы между собой и с рабочими поверхностями агрегата. Частицы, которые примыкают к рабочим поверхностям измельчающего оборудования, обладают значительно меньшей возможностью перемещений в примыкающем слое, что изменяет картину разрушения. На основе этого процесс дробления можно условно разделить на два основных этапа.

Первый этап протекает при относительно невысоких нагрузках и сопровождается уплотнением частиц (с возникновением как упругих, так и пластических деформаций). При этом разрушаются менее прочные элементы. Данный процесс происходит по ослабленным сечениям или трещинам.

Второй этап измельчения характеризуется преобладанием пластических деформаций всего объема материала, при этом основное разрушение происходит за счет перемещения частиц относительно друг друга.

Недостатком существующих технологий измельчения является то, что в процессе дробления возникают частицы различной дисперсности. При этом есть такие, размер которых не требует дальнейшего разрушения, но они остаются в общей массе материала, принимая на себя значительную часть действующих сил, что приводит к

поглощению части энергии разрушения и переизмельчению, вследствие чего замедляется процесс дробления крупных кусков породы.

Более эффективная схема дробления реализуется в том случае, если рабочие поверхности оборудования совершают движения, приводящие к одновременному сжатию и сдвигу. Одновременное действие касательных и осевых сил существенно улучшает эффективность процесса измельчения вследствие того, что предел прочности на сдвиг в среднем составляет 8...16% от предела прочности на сжатие. Следовательно, разработка оборудования для измельчения слабых горных пород с помощью комбинированного нагружения является актуальной задачей.

С учетом отрицательного эффекта при наличии в массе измельчаемой горной породы частиц, которые из-за своего размера не нуждаются в дальнейшем разрушении и приводят к снижению эффективности процесса измельчения, необходимо в конструкции разрабатываемых устройств предусмотреть возможность удаления (классификации) таких частиц в процессе работы (например, с использованием принципа барабанного грохота).

РАЗРАБОТКА ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ-КЛАССИФИКАТОРА

На основе анализа типового дробильно-сортировочного оборудования была разработана принципиально новая конструкция измельчителя-классификатора [5] (рис. 1). Данное конструкторское решение позволяет 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.

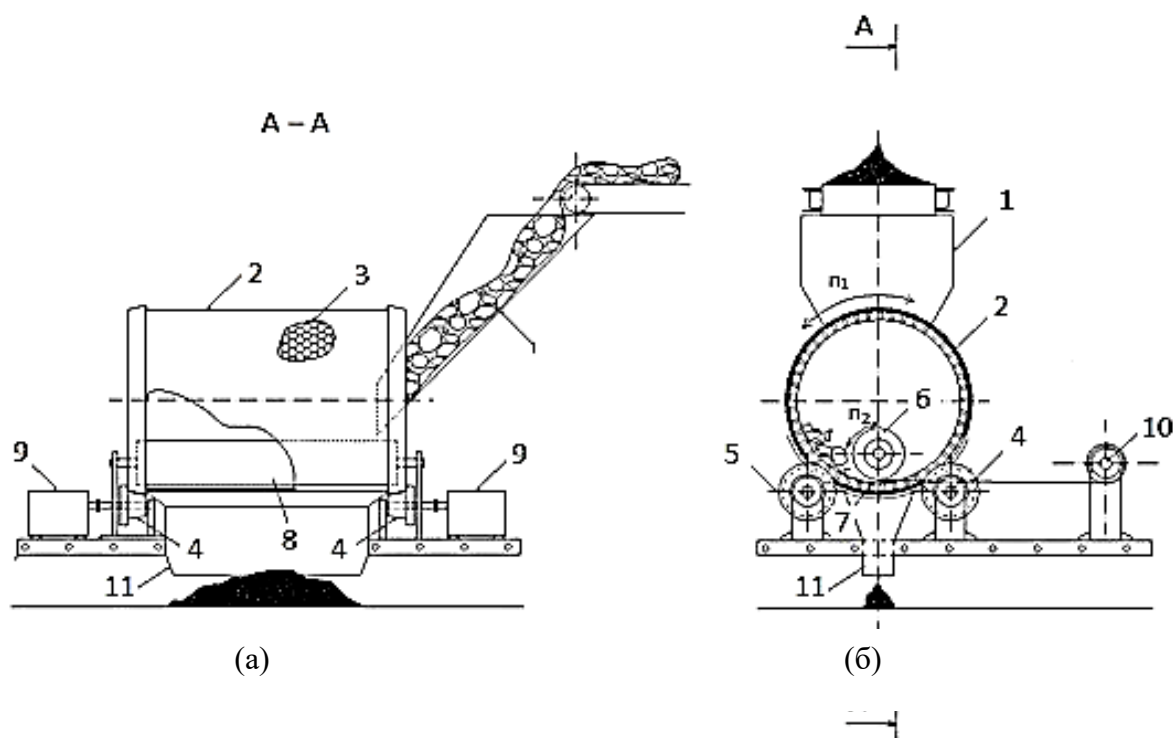


Рис. 1. Схема измельчителя-классификатора: разрез А-А (а); общий вид измельчителя-классификатора (б)

Измельчитель-классификатор (см. рис. 1) имеет загрузочное устройство 1, вращающийся перфорированный барабан 2 с перфорациями 3, который опирается на

приводной 4 и поддерживающий ролики 5. Внутри перфорированного барабана размещается рабочий орган в виде вала-измельчителя 6, который устанавливается с технологическим зазором 7, соответствующим размеру отверстий в перфорированном барабане. Вал-измельчитель 6 имеет сменные рабочие рельефные накладки 8. Перфорированный барабан 2 и вал-измельчитель 6 приводятся в движение реверсивными индивидуальными приводами 9 и 10. Под нижней частью перфорированного барабана установлено разгрузочное устройство 11.

Измельчитель-классификатор функционирует следующим образом. Предварительно подобранный по размеру исходный материал подается через загрузочное устройство 1 и попадает внутрь вращающегося перфорированного барабана 2. Тангенциальная скорость перфорированного барабана меньше тангенциальной скорости вала-измельчителя за счет применения индивидуального привода. Измельчаемый материал в зазоре 7 между валом-измельчителем 6 и перфорированным барабаном 2 подвергается высокоэффективному дроблению и через отверстия перфорированного барабана 3 перемещается в разгрузочное устройство 11.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ДРОБЛЕНИЯ СЛАБЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Для предварительного анализа процесса дробления слабых горных пород с учетом тангенциальных сил можно использовать приближенный энергетический метод [6]. Он основан на применении экстремальных принципов теории пластичности и состоит в том, что действительное поле линий скольжения пластически деформируемого материала заменяется более простым кинематически возможным полем, состоящим из отдельных жестких блоков и удовлетворяющим граничным условиям в скоростях и перемещениях. На рис. 2 представлены поле линий скольжения и план скоростей движения блоков при сжатии толстой пластины между двумя плоскими поверхностями.

Поле линий скольжения и план скоростей являются взаимными диаграммами Максвелла. Следовательно, для получения плана скоростей применимы обычные методы графостатики, при этом выполнение кинематических условий достигается автоматически.

Мощность, необходимая для обеспечения такой схемы деформации, превышает действительную мощность внутренних сил при пластическом формоизменении. Следовательно, удельные усилия, вычисленные при помощи этого метода, являются верхней оценкой их действительных значений.

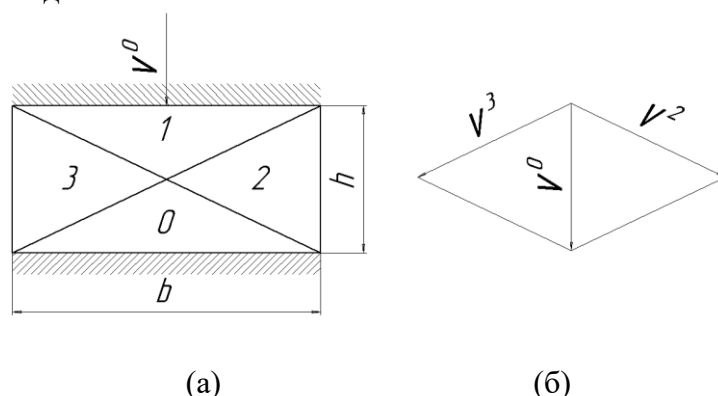


Рис. 2. Возможное поле линий скольжения блоков (а) и план скоростей движения блоков (б) при сжатии толстой пластины

Мощность внутренних сил w_i , вычисляемая по принятому кинематически возможному полю, состоящему из отдельных жестких блоков, равна мощности, развиваемой на поверхностях, вдоль которых имеют место разрывы скоростей величиной v_i , и определяется по формуле

$$w_i = k \int_f^1 v_i df_i, \quad (1)$$

где k – пластическая постоянная материала (предел текучести при сдвиге); v_i – скорость относительного перемещения соседних блоков; f_i – площадь поверхности скольжения между двумя блоками.

Мощность внешних сил w_0 при поступательном движении инструмента, осуществляющего пластическое деформирование, равна

$$w_0 = q f_0 v_0 - 2\mu k \int_f^1 v_j df_j, \quad (2)$$

где q – удельное усилие на поверхности деформирующего инструмента f_0 ; v_0 – скорость поступательного движения инструмента; μ – коэффициент трения; v_j – величина разрыва скорости на площади f_j ; f_j – площадь контакта между материалом и инструментом, где возникают силы трения.

Из условия равенства мощностей внешних и внутренних сил находим

$$q/2k = (\int_{f_j}^1 v_i df_i + 2\mu \int_{f_j}^1 v_j df_j) / 2 f_0 v_0 \quad (3)$$

при условии плоской деформации

$$f_i = l_i t, \quad f_j = l_j t, \quad f_0 = b t,$$

где l_i и l_j – длина площадок скольжения в плоскости деформации; t – размер площадок в перпендикулярном направлении; b – ширина проекции контактной площадки на плоскость ($b = 1$), перпендикулярную направлению движения инструмента.

Если b и v_0 принять за единицы длины и скорости, удельное усилие для процессов плоской деформации будет определяться по формуле

$$q/2k = 0,5(\sum_i^1 v_i l_i + 2\mu \sum_j^1 v_j l_j), \quad (4)$$

где l_i , l_j и v_i , v_j являются безразмерными длинами и скоростями. Величины их могут быть легко найдены из принятого кинематически возможного поля и соответствующего плана скоростей [7].

Используя возможное поле линий скольжения и план скоростей (см. рис. 1), можно получить давление, возникающее на поверхности деформирующего инструмента:

$$q/2k = 1/\sin 2\alpha + \mu b/2h, \quad (5)$$

где b и h – размеры пластины; α – угол между направлением движения инструмента и линией скольжения между блоками 1 и 2 (см. рис. 2).

Если проводить анализ дробления внутри барабана мельницы рабочим органом в виде вала-измельчителя с помощью энергетического метода расчета, то нужно разработать расчетную модель процесса, соответствующую условиям деформации измельчаемого материала. На рис. 3 представлена схема процесса дробления горной

породы в барабане мельницы валом-измельчителем. Рабочее пространство, в котором происходит дробление, можно условно разделить на две зоны: зона *A* соответствует объему, в котором происходит уплотнение материала и частично пластически и упруго деформируются менее прочные фракции; зона *B* представляет собой уплотненную среду, в которой за счет интенсивной пластической деформации происходит интенсивное дробление горной породы.

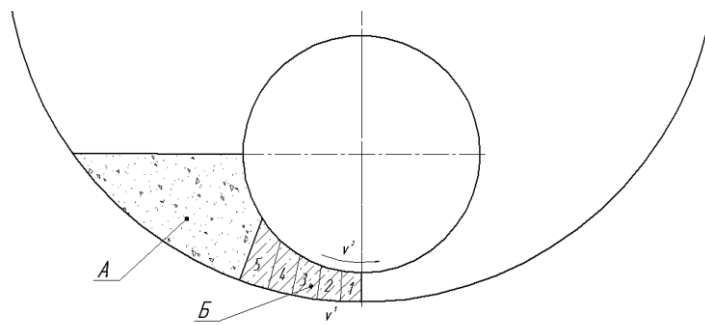


Рис. 3. Схема процесса дробления горной породы в барабане мельницы валом-измельчителем (зоны *A* и *B*)

Для получения кинематически возможного поля линий скольжения разобьем зону *B* на секторы, протяженность которых выберем равной величине минимального зазора между барабаном мельницы и валом-измельчителем (секторы обозначим цифрами 1–5). Если тангенциальные скорости барабана V^1 и вала-измельчителя V^2 будут равны, то зону *B* можно представить в виде возможного поля линий скольжения, которое ограничивается областью пластической деформации между двумя плоскостями, расположенными под углом γ друг к другу и движущимися навстречу (рис. 4). Скорость сближения V^r можно выразить через расстояние h (минимальный зазор между барабаном мельницы и валом-измельчителем), отнесенное ко времени поворота барабана на угол ω , соответствующий длине сектора зоны *B*.

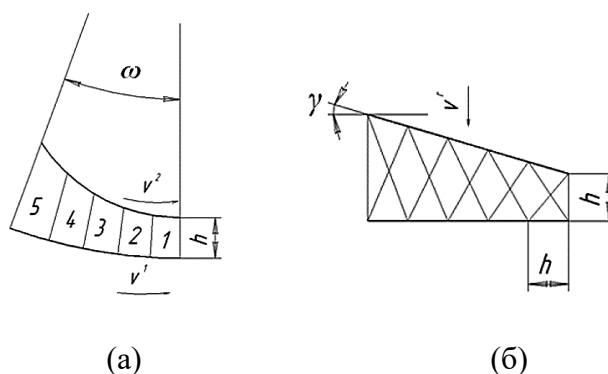


Рис. 4. Зона пластических деформаций: зона *B* (а) (см. рис. 3); возможное поле линий скольжения жестких блоков в зоне *B* (б)

На основе выражения (5) можно рассчитать давление, возникающее на поверхности вала-измельчителя, и определить мощность, необходимую для осуществления процесса дробления.

Иная картина возникнет, если тангенциальная скорость вала-измельчителя V^2 будет больше тангенциальной скорости барабана V^1 (рис. 5). Так как тангенциальная

скорость вала-измельчителя выше тангенциальной скорости барабана, то образуется относительная тангенциальная скорость V^r , с ростом которой линии скольжения разворачиваются вдоль ее вектора. При допущении, что линии скольжения будут стремиться развернуться параллельно тангенциальной скорости V^r , в некотором приближении представляется деформация за счет тангенциальных сил, близкая по своим параметрам к деформации в неньютоновской пластической жидкости. Указанное допущение позволяет рассчитать мощность, необходимую для такой деформации, при использовании известных выражений, полученных для неньютоновской пластической жидкости, что позволит провести предварительный анализ процесса дробления слабых горных пород с помощью касательных сил.

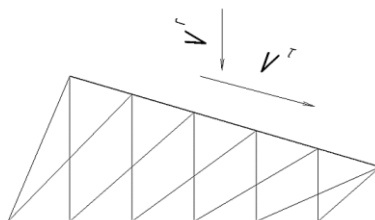


Рис. 5. Возможное поле линий скольжения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В задачах об установившемся движении среды необходимость задания начальных условий отпадает. Граничные условия должны определять скорости части среды на границах (например, на стенках каналов), а также давление на свободной поверхности вещества и на поверхностях раздела. В качестве допущения при решении задач течения дисперсной среды принимаем, что частицы «прилипают» к поверхностям обтекаемых твердых тел. В силу этого можно считать, что на неподвижных твердых поверхностях скорости частиц равны нулю, а на движущихся в дисперсной среде твердых поверхностях скорости частиц совпадают по величине и направлению со скоростями соответствующих точек поверхности.

Для решения поставленных задач при дроблении слабых горных пород, в которых характер течения среды несколько отличается от характера течения ньютоновских жидкостей, необходимо использовать другой подход. При изучении материалов, обладающих характеристиками пластичности, определили, что процесс течения (подобно ньютоновскому) начинается для рассматриваемого класса вещества не сразу, а при достижении некоторого постоянного предельного напряжения сдвига τ_0 [8]. Тогда напряжение сдвига будет

$$\tau = \tau_0 + \mu_{\text{пл}} \delta u / \delta y, \quad (6)$$

где $\mu_{\text{пл}}$ — коэффициент вязкости, который характеризует внутреннее трение вязко-пластичного материала ($\mu_{\text{пл}} = \text{const}$).

Если напряжение сдвига $\tau < \tau_0$, то вещества ведут себя как упругие твердые тела. Однако более глубокое исследование дисперсной горной массы показало, что ее свойства при деформировании отличаются от свойств вязкой жидкости. Имеет место так называемое явление аномалии вязкости. Оно заключается в том, что при достижении некоторого предельного напряжения сдвига вязкость текущей дисперсной горной массы меняется вместе с ростом градиента скорости. Вязкость таких

материалов, зависящую от напряжения сдвига, принято называть эффективной. При этом форма реологического выражения аналогична случаю ньютоновской жидкости:

$$\tau = \mu_3 \gamma, \quad (7)$$

где τ – напряжение сдвига, включающее в себя также и предельное напряжение сдвига τ_0 ; μ_3 – коэффициент эффективной вязкости, $\mu_3 = f(\gamma)$; γ – градиент скорости, $\gamma = \partial u / \partial y$.

Вязкость рассматриваемых материалов зависит от градиента скорости, но для упрощения получаемых расчетных зависимостей используют метод так называемого «замораживания коэффициентов». Допускается, что в процессе расчетов $\mu_3 = \text{const}$, т.е. данный коэффициент отражает некоторое «усредненное» значение вязкости при некотором «среднем» значении градиента скорости потока исследуемой среды в рабочем пространстве, где $\gamma_{\text{ср.з}}$ возникает при воздействии на рабочую среду поверхностями технологических элементов машины. Такое допущение, безусловно, оказывает влияние на точность расчетов по данному методу, однако полученные этим способом расчетные значения хорошо совпадают с экспериментальными данными, а точность полученных результатов в большой степени обусловливается точностью определения реологических свойств перерабатываемой дисперсной горной массы [9].

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. Т. 1: Процессы и машины. М.: Горная книга. 2012. 420 с.
3. Авдохин В.М. Обогащение углей: учебник для вузов: в 2 т. Т. 2: Технологии. М.: Горная книга. 2012. 473 с.
4. Донченко А.С., Донченко В.А. Справочник механика рудообогатительной фабрики. М.: Недра. 1986. 543 с.
5. Бибиков П.Я., Бардовский А.Д., Митусов П.Е., Калакутский А.В. Разработка конструкции измельчителя-классификатора для переработки слабых горных пород // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015. № 3. С. 233–237.
6. Горлов И.В. Анализ надежности торфяных машин в процессе проектирования // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 4 (8). С. 32–38.
7. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов. М.: Металлургия. 1972. 408 с.
8. Алексеева К.Г., Борзенко Е.И. Структура течения жидкости Шведова – Бингама в канале со скачком сечения // *Известия вузов. Физика*. 2012. № 7-2. С. 15–19.
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.
10. Шрамм Г. Основы практической реологии. М.: Колос. 2003. 296 с.

Для цитирования: Горлов И.В., Митусов П.Е. Анализ процесса измельчения слабых горных пород // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 1 (13). С. 57–65.

ANALYSIS OF THE GRINDING PROCESS WEAK ROCKS

I.V. GORLOV¹, Dr. Sc., P.E. MITUSOV²

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

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

The paper presents an analysis of various methods of destruction of rocks for the most common mining machines. The basics of the process of destruction of weak rocks and their influence on the energy efficiency of destruction are described. The need to develop a new type of grinding equipment that can be used for the simultaneous destruction and classification of weak rocks has been substantiated. The design of the grinder-classifier is presented, its description is given, and the principle of operation and the basis of engineering calculations of parameters are presented.

Keywords: shredder-classifier, fields of slip lines, shear stresses, shaft-shredder, perforated drum, different peripheral speeds.

REFERENCES

1. Alvanyan A.K., Alvanyan K.A. Physical and mechanical properties of gypsum stone and geotechnical conditions of Selishchensky deposits of building gypsum. *Vestnik Permskogo nacionalnogo issledovatel'skogo politexnicheskogo universiteta. Geologiya*. 2019. V. 18. No. 4, pp. 386–393. (In Russian).
2. Avdokhin V.M. Obogashcheniye ugley: Uchebnik dlya vuzov: v 2 t. T. 1: Protsessy i mashiny [Coal processing: Textbook for universities: in 2 v. V. 1: Processes and machines]. Moscow: Gornaya kniga. 2012. 420 p.
3. Avdokhin V.M. Obogashcheniye ugley: Uchebnik dlya vuzov: v 2 t. T. 2: Tekhnologii [Coal processing: Textbook for universities: in 2 v. V. 2: Technologies]. Moscow: Gornaya kniga. 2012. 473 p.
4. Donchenko A.S., Donchenko V.A. Spravochnik mekhanika rudoobogatitel'noy fabriki [Handbook of the mechanic of the ore processing plant]. Moscow: Nedra. 1986. 543 p.
5. Bibikov P.Ya., Bardovsky A.D., Mitusov P.E., Kalakutsky A.V. Development of the design of a grinder-classifier for processing weak rocks. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten (nauchno-texnicheskij zhurnal)*. 2015. No. 3, pp. 233–237. (In Russian).
6. Gorlov I.V. Analysis of the reliability of peat machines in the design process. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskkiye nauki»*. 2020. No. 4 (8), pp. 32–38. (In Russian).
7. Tomlenov A.D. Teoriya plasticheskogo deformirovaniya metallov [The theory of plastic deformation of metals]. Moscow: Metallurgiya. 1972. 408 p.
8. Alekseeva K.G., Borzenko E.I. The structure of the flow of the Shvedov – Bingham liquid in a channel with a jump in the section. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2012. No. 7-2, pp. 15–19. (In Russian).
9. Gorlov I.V. Analysis of the results of an empirical study of plastic deformation during the restoration of parts of peat machines. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskkiye nauki»*. 2020. No. 2 (6), pp. 71–78. (In Russian).
10. Schramm G. Osnovy prakticheskoy reologii [Fundamentals of practical rheology]. Moscow: Kolos. 2003. 296 p.

Поступила в редакцию/received: 23.12.2021; после рецензирования/revised: 27.12.2021;
принята/accepted: 30.12.2021