

# Анализ процесса измельчения слабых горных пород

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-6-44-47>

## ГОРЛОВ И.В.

Профессор Тверского государственного  
технического университета (ТвГТУ),  
170026, Тверь, Россия,  
e-mail: gorloviv@yandex.ru

## МИТУСОВ П.Е.

Главный специалист технического отдела  
Московского научно-исследовательского  
проектно-изыскательского института  
технологий и инноваций (МНИПИИТИ),  
117105, Москва, Россия,  
e-mail: p.mitusov@mnipiiti.ru

## БЕЛЯЕВ А.М.

Аспирант НИТУ «МИСИС»,  
119049, г. Москва, Россия,  
e-mail: al.m.belyaev@ya.ru

*В статье проведен анализ и представлен обзор принципов дробления различных горных пород в широко применяемых горных машинах и агрегатах. Дано описание основных и сопутствующих процессов и определены параметры, влияющие на энергоэффективность.*

**Ключевые слова:** *измельчитель-классификатор, деформация породы, измельчение слабых горных пород, оптимизация энергозатрат.*

**Для цитирования:** Горлов И.В., Митусов П.Е., Беляев А.М. Анализ процесса измельчения слабых горных пород // Уголь. 2022. № 6. С. 44-47. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-44-47.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время не уделяется необходимого внимания особенностям процесса измельчения горных пород средней и слабой прочности, к ним относятся тальк, мел, гипс, слабые известняки и др. [1, 2, 3]. 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 [4, 5]. Такое оборудование спроектировано под достаточно широкий круг задач, однако при этом оно использует традиционные принципы измельчения горных пород, что приводит в некоторых случаях 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.

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 измельчители [6, 7, 8, 9].

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 с рабочими органами (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. При таком

воздействии на породу ее разрушение происходит не селективно.

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.

### ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Из анализа рассмотренных схем измельчающего оборудования установлено, что представленные способы измельчения, как правило, сопровождаются сопутствующими процессами, энергетические затраты которых трудно оцениваются. В широко распространенном методе дробления в валковых дробилках основным воздействием на измельчаемую породу является сжатие, эффективность которого оценивается через энергозатраты на создание крутящего момента на дробящих валках. Сопутствующим сжатию является процесс истирания, который обусловлен вращением дробящих валков. Оценить долю энергозатрат на данный процесс чрезвычайно сложно.

На рынке измельчительного оборудования не представлено специализированных машин и агрегатов, спроектированных для измельчения слабых горных пород, в связи с чем в технологических линиях предприятий, занимающихся переработкой слабых горных пород, используется оборудование с электродвигателями или гидромоторами значительно завышенной мощности и металлоемкости, рассчитанными на измельчение горных пород средней и высокой крепости. Энергоэффективность процесса измельчения в таких технологических линиях сильно занижена. Проектный коэффициент загрузки привода конусной дробилки, рассчитанной на переработку горных пород средней и высокой прочности, составляет 0,44. На практике использования аналогичного оборудования при измельчении горных пород слабой прочности данный коэффициент снижается до 0,12-0,15.

В некоторых случаях затраты энергии на измельчение слабых горных пород превышают в разы затраты энергии на разрушение пород средней и высокой прочности. Затраты энергии при измельчении 1 т кварцитов или корундов, относящихся к прочным, составляют 45 и 54 кВт·ч соответственно. Пределы прочности кварцита и корунда составляют 400-500 МПа. При этом на дробление 1 т талька или гипса затрачивается до 111 и 125 Вт·ч/т соответственно. Предел прочности на одноосное сжатие данных пород, относящихся к слабым, составляет 28-40 МПа.

Использование оборудования, работающего по принципу раздавливающе-стирающего действия, приводит к снижению энергопотребления. К такому оборудованию относятся бегунковые измельчители, валковые дробилки и роллер-прессы. Благодаря созданию объ-

емного уплотнения горной породы в процессе измельчения в данном оборудовании обеспечивается воздействие частиц друг на друга и на стенки камеры дробления. Отсутствие возможности относительных перемещений частиц в контактном слое, примыкающем к поверхностям рабочей камеры, приводит к разделению процесса измельчения на две стадии.

На первой стадии, при малых нагрузках, происходит уплотнение частиц с образованием упругопластических деформаций, в результате которых менее прочные частицы разрываются по ослабленным сечениям или трещинам. На второй стадии процесса измельчение происходит за счет пластических деформаций всего объема породы за счет относительного перемещения частиц в общем объеме.

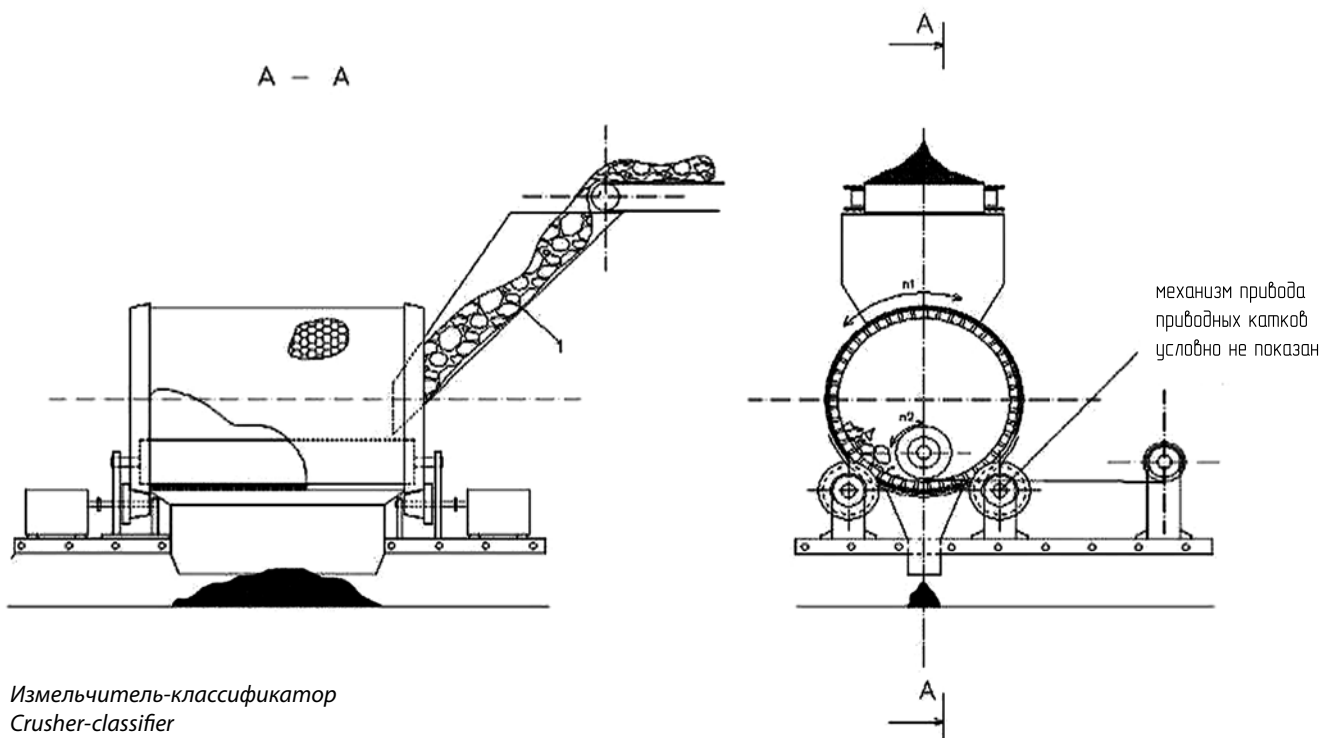
Принцип дробления, при котором одновременно прикладываются усилия на сжатие и сдвиг, является более результативным, поскольку одновременное действие касательных и осевых сил существенно улучшает производимый эффект процесса измельчения. Данный эффект производится тем, что разрушение горных пород происходит усилием сдвига, величина которого не превышает 1/6 от прочности на одноосное сжатие. Следовательно, разработка оборудования для измельчения слабых горных пород по принципу сжатие-сдвиг является важной задачей.

Также сниженная энергоэффективность технологических линий обусловлена завышенным энергопотреблением при переизмельчении ввиду отсутствия одновременной классификации при измельчении. В процессе дробления на разных стадиях образуются частицы различной крупности. Частицы, размер которых соответствует заданным значениям конечного продукта (кондиционные), подвергаются переизмельчению в общем объеме материала, обусловленного воздействием разрушающих сил, и поглощению энергии разрушения, необходимой для разрушения крупных (некондиционных) кусков породы.

Учитывая необходимость оптимизации энергозатрат при измельчении кондиционных частиц разрушаемой горной породы, в разрабатываемой конструкции необходимо предусмотреть возможность удаления (классификации) таких частиц в процессе работы установки, например по принципу барабанного грохота.

На основе анализа используемого измельчительного оборудования была разработана принципиально новая конструкция «Измельчителя-классификатора» [3], представленная на *рисунке*, защищенная Патентом Российской Федерации [6]. Данное конструкторское решение позволяет совместить процессы измельчения и классификации в одном агрегате, минуя конвейерную перегрузку. Данный агрегат, использующий принцип дробления, при котором к измельчаемому материалу одновременно прикладываются усилия на сжатие и сдвиг, позволяет эффективно применять его для измельчения слабых горных пород.

На *рисунке* слева изображен общий вид измельчителя-классификатора, а справа *p-разрез А-А*. Принцип работы измельчителя-классификатора заключается в дроблении и одновременной классификации горной породы,



Измельчитель-классификатор  
Crusher-classifier

которая, попадая внутрь вращающегося перфорированного барабана, в зазоре между валом-измельчителем подвергается воздействию сжимающих (осевых) и сдвигающих (тангенциальных) усилий. Одновременно с разрушением кондиционные частицы, удовлетворяющие конечной фракции, удаляются из зоны дробления через отверстия перфорированного барабана, не подвергаясь переизмельчению, в разгрузочное устройство.

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, определено, что характер течения среды несколько отличается от характера течения ньютоновских жидкостей. При изучении материалов, обладающих пластичными характеристиками, определили, что процесс течения, подобный ньютоновскому, начинается для рассматриваемого класса вещества не сразу, а при достижении предельного напряжения сдвига  $\tau_0$  [7], исходя из чего расчет производится по формуле:

$$\tau = \tau_0 + \mu_{nl} \delta u / \delta y, \quad (1)$$

где  $\mu_{nl}$  – коэффициент вязкости, оценивающий внутреннюю силу трения вязко-пластичного материала,  $\mu_{nl} = \text{const}$ .

Опираясь на утверждение, что в случае  $\tau < \tau_0$  поведение вещества будет аналогично поведению упругого твердого тела, было проведено исследование дисперсной горной массы, которое показало, что при деформировании имеет место явление аномалии вязкости. Данное явление обусловлено тем, что при достижении предельного напряжения сдвига коэффициент вязкости дисперсной горной массы коррелируется с ростом градиента скорости. Вязкость материалов, изменяющаяся при воздействии сдвиговых напряжений, обозначается как «эффективная». Реологическое выражение выглядит следующим образом и аналогично ньютоновской жидкости;

$$\tau = \mu_3 \gamma, \quad (2)$$

где  $\tau$  – напряжение сдвига;  $\mu_3$  – коэффициент эффективной вязкости,  $\mu_3 = f(\gamma)$ ;  $\gamma$  – градиент скорости,  $\gamma = \delta u / \delta y$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вязкость рассматриваемых материалов изменяется от градиента скорости, но для упрощения получаемых расчетных зависимостей используют метод так называемого «замораживания коэффициентов», допускается, что в процессе расчетов  $\mu_3 = \text{const}$ , то есть оно отражает некоторое «усредненное» значение вязкости при некотором «среднем» значении градиента скорости потока исследуемой среды в рабочем пространстве, где  $\gamma_{\text{ср.э}}$  возникает при воздействии на рабочую среду поверхностями технологических элементов машины. Такое допущение, безусловно, оказывает влияние на точность расчетов по данному методу, однако полученные расчетные значения подтверждаются экспериментальными данными, а точность полученных результатов зависит от точности определения реологических свойств перерабатываемой дисперсной горной массы.

## Список литературы

1. Сивченко Л.А., Добровольский Ю.К. История развития и современный уровень техники измельчения // Вестник Белорусско-Российского университета. 2012. № 4. С. 69-76.
2. Дворников Л.Т., Макаров А.В. К проблеме совершенствования щековых дробильных машин // Машиностроение. 2011. № 21. С.115-131.
3. Андреев Е.Е., Тихонов О.Н. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению. СПб.: СПбГИ, 2007. 439 с.
4. Пат. 2531438С2 РФ. МПК В07В1/00. Измельчитель-классификатор / П.Я. Бибииков, А.Д. Бардовский, П.Е. Митусов, Б.В. Воронин, Н.М. Кряжев. Патентообладатель ФГАОУ ВПО НИТУ «МИСиС»; заявл. 12.17.2012; опубл. 20.10.2014. Бюл. № 29.
5. Шашкин А.Г. Описание деформационного поведения глинистого грунта с помощью вязкоупругопластической модели // Инженерная геология. 2010. № 4. С. 22–32.
6. Разработка конструкции измельчителя-классификатора для переработки слабых горных пород / П.Я. Бибииков, А.Д. Бардовский и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 3. С. 233-237.
7. Горлов И.В., Болотов А.Н. Изменение механических свойств изношенной поверхности, восстановленной пластическим деформированием // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 7. С. 3-7.
8. Formation of Comprehensive Service System of Belt Conveyor Gearboxes / V.Gerike, Y. Drozdenko, E.Kuzin et al. // E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 41. DOI: 10.1051/E3SCONF/20184103011.
9. The results of cutting disks testing for rock destruction / A. Khoreshok, L. Kantovich, V. Kuznetsov et al. // E3S Web of Conferences. 2017. 15.03004. DOI:10.1051/E3SCONF/20171503004.

## Original Paper

UDC 622.002.5:621.926 © I.V. Gorlov, P.E. Mitusov, A.M. Belyaev, 2022  
 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2022, № 6, pp. 44-47  
 DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-6-44-47>

## Title

### ANALYSIS OF CRUSHING PROCESS OF INCOMPETENT ROCKS

## Authors

Gorlov I.V.<sup>1</sup>, Mitusov P.E.<sup>2</sup>, Belyaev A.M.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Tver State Technical University, Tver, 170026, Russian Federation

<sup>2</sup> Moscow Research and Design Institute for Technology and Innovation, Moscow, 117105, Russian Federation

<sup>3</sup> National University of Science and Technology "MISIS" (NITU "MISIS"), Moscow, 119049, Russian Federation

## Authors Information

**Gorlov I.V.**, Professor, e-mail: [gorloviv@yandex.ru](mailto:gorloviv@yandex.ru)

**Mitusov P.E.**, Chief Specialist of the Technical Department,

e-mail: [p.mitusov@mnipti.ru](mailto:p.mitusov@mnipti.ru)

**Belyaev A.M.**, Postgraduate student, e-mail: [gotim@misis.ru](mailto:gotim@misis.ru)

## Abstract

The article analyses and presents an overview of the crushing principles for various rocks in commonly used mining machines and equipment. The main and associated processes are described and parameters affecting the energy efficiency are identified.

## Keywords

Crusher and classifier, Rock deformation, Crushing of incompetent rocks, Optimization of energy costs.

## References

1. Sivchenko L.A. & Dobrovolskiy Yu.K. History of development and modern level of grinding technology. *Vestnik Belarusian-Russian University*, 2012, (4), pp. 69-76. (In Russ.).
2. Dvornikov L.T. & Makarov A.V. To the problem of improving jaw crushing machines. *Industrial Engineering*, 2011, (21), pp. 115-131. (In Russ.).
3. Andreev E.E. & Tihonov O.N. Crushing, grinding and preparation of raw materials for enrichment. Saint Petersburg.: Saint Petersburg Mining University Publ., 2007. 439 c. (In Russ.).

4. Bibikov P.Ya., Bardovskiy A.D., Mitusov P.E., Voronin B.V. & Kryagev N.M. Shredder-classifier, Patent № RU2531438C2; claim 12.17.2012; publ. 21.10.2014. Bul. № 29. (In Russ.).

5. Shashkin A.G. Description of the deformation behavior of clay soil using a viscoelastic model. *Engineering Geology*, 2010, (4), pp. 22–32. (In Russ.).

6. Bibikov P.Ya., Bardovskiy A.D., Mitusov P.E. & Kalakutskiy A.V. Development of a design of a shredder-classifier for processing weak rocks. *Gorniy informacionno-analiticheskij byulleten'*, 2015, (3), pp. 233-237. (In Russ.).

7. Gorlov I.V. & Bolotov A.N. Change of mechanical properties of the worn surface restored by plastic deformation. *Hardening technologies and coatings*, 2014, (7), pp. 3-7. (In Russ.).

8. Gerike B., Drozdenko Y., Kuzin E., Ananyin I. & Kuziev D. Formation of Comprehensive Service System of Belt Conveyor Gearboxes. *E3S Web of Conferences*, 2018, (41), 03011. DOI:10.1051/E3SCONF/20184103011.

9. Khoreshok A., Kantovich L., Kuznetsov V., Preis E. & Kuziev D. The results of cutting disks testing for rock destruction. *E3S Web of Conferences*, 2017, (15), 03004. DOI: 10.1051/E3SCONF/20171503004.

## For citation

Gorlov I.V., Mitusov P.E. & Belyaev A.M. Analysis of crushing process of incompetent rocks. *Ugol'*, 2022, (6), pp. 44-47. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-44-47.

## Paper info

Received April 29, 2022

Reviewed May 16, 2022

Accepted May 23, 2022

## MINING EQUIPMENT