

of Russia are more acute, since salts contribute to the development of thermokarst, thermal erosion and solilux processes, due to which the level of permafrost deepens and chemozems are formed near industrial sites. Scientists are considering various methods of recultivation of saline soils, which can be divided into three areas: increasing the salt tolerance of plants, selecting stress-resistant plants (halophytes) and increasing the bio-genicity of techno-soils. However, in the Arctic regions with harsh climatic conditions and low biological productivity, restoration methods require careful selection, especially on disturbed soils in the mining industry. In this connection the purpose of this review article is to use available sources and published literature on soil salinisation in general, and particularly in the Far North, to highlight available methods for reclamation of areas affected by salinisation in mining.

Keywords: soil degradation, salinization, secondary salinization, Far North, salt tolerance, halophytes, biogenicity.

Поступила в редакцию/received: 21.04.2025; после рецензирования/revised: 27.04.2025;
принята/accepted: 30.04.2025

УДК 622.73

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АГРЕГАТА ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ГОРНЫХ ПОРОД, ОБЛАДАЮЩИХ ПЛАСТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

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

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

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

© Горлов И.В., Митусов П.Е., 2025

Статья содержит анализ типовых агрегатов для классификации и измельчения материалов. Предложен комплексный агрегат нового типа, который может использоваться для переработки слабых горных пород, обладающих выраженными пластическими свойствами, и позволит осуществлять в рамках единого цикла как измельчение, так и классификацию исследуемых материалов, исключая дополнительную транспортировку и промежуточное хранение продукта переработки. Описан принцип действия агрегата, также представлены некоторые элементы инженерных расчетов для определения наиболее важных технологических параметров при переработке указанных горных пород. Приведены результаты оценки эффективности процесса при использовании измельчителя-классификатора.

Ключевые слова: измельчение, классификация горных пород, энергетический метод, сдвиговые напряжения, вал-измельчитель, перфорированный барабан, эффективность.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-3-93-102

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 недостаточное внимание уделяется горным породам, обладающим средней и слабой прочностью с достаточно высокими пластическими свойствами. К таким породам можно отнести слабые известняки, гипс, мел, тальк и др. [1]. Использование традиционного технологического оборудования для переработки средних и слабых горных пород, характеризующихся существенными пластическими свойствами, может приводить к повышенному энергопотреблению при измельчении и классификации. Так, при измельчении каолиновых глин с использованием шаровых барабанных мельниц эффективность процесса помола может снижаться более чем на 40 % по сравнению с переработкой пород, которые не обладают пластическими свойствами.

Несмотря на низкую эффективность, на предприятиях для переработки слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, в большинстве случаев используется традиционное оборудование [2]. Такое оборудование хотя и имеет возможность решать достаточно широкий перечень технологических задач на основе типовых методов разрушения горных пород, но в рассматриваемом случае это приводит к значительному снижению эффективности процесса измельчения из-за завышенной металлоемкости и мощности типовых агрегатов и их непригодности для переработки пластичных горных пород. Следует отметить, что оборудование, предназначенное для переработки таких 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 ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТИПОВЫХ АГРЕГАТОВ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ГОРНЫХ ПОРОД

Предприятия горной промышленности нашей страны для измельчения различных материалов используют широкий спектр технологического оборудования, которое воздействует на горную породу различными способами: разламыванием и раскалыванием; раздавливанием и истиранием с раздавливанием; ударом и ударом с истиранием; коллоидной обработкой и др. [3].

Кроме того, по Э.А. Хопунову [4], оборудование можно классифицировать по таким факторам воздействия на породу, как нагрузка, длительность нагрузки и место ее приложения. Анализ факторов воздействия показывает, что для существующих методов измельчения, как правило, трудно теоретически оценить энергетические затраты вследствие взаимного влияния одновременно действующих факторов. Исходя из данных, представленных в работе Э.А. Хопунова, для существующего измельчительного оборудования было установлено, что валковый пресс является наиболее перспективным агрегатом с точки зрения переработки слабых горных пород, обладающих существенными пластическими свойствами. Валковый пресс аналогичен валковой дробилке, но принцип воздействия на горную породу у них различен: в валковом прессе разрушение породы в большей мере происходит за счет взаимодействия измельчаемых элементов породы, что способствует эффективной

передаче энергии, необходимой для разрушения. Измельчение в валковых прессах осуществляется в закрытых объемах, что не позволяет отдельным частицам вырываться из зоны пластической деформации и, как следствие, обеспечивает относительно высокую производительность и уменьшение износа рабочих органов оборудования по сравнению с агрегатами других типов.

В большинстве типовых агрегатов для измельчения эффективность существенно снижается из-за того, что в зоне разрушения присутствуют частицы, которые не требуют дальнейшего измельчения, но продолжают измельчаться. Это приводит к переизмельчению и дополнительным затратам энергии. 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, содержащий частицы различных фракций, которые подвергаются дальнейшей классификации с разделением на фракции и отделением кондиционного продукта, при этом более крупные фракции отправляются на вторичную переработку. Для классификации горных пород могут использоваться специальные виды классификаторов (гидравлические, механические, пневматические, электрофизические, электромагнитные и др.).

Механические классификаторы обладают достаточно высокой производительностью, характеризуются относительно невысокими энергозатратами и обеспечивают качественное разделение продукта на фракции с помощью калиброванных сит или решеток. Такие классификаторы бывают циклического (грохоты) и непрерывного действия (барабанные классификаторы и др.).

Барабанные классификаторы имеют высокую производительность, могут использоваться для различающихся по свойствам пород и являются устройствами непрерывного действия. Кроме того, они могут применяться для классификации трудногрохотимых материалов, обладающих выраженными пластическими свойствами. Однако существенным недостатком таких классификаторов является снижение эффективности классификации из-за увеличения концентрации частиц мелких фракций в исходном материале. Для снижения негативного эффекта рядом ученых предложены выражения для теоретического анализа процесса классификации с получением рациональных режимов грохочения в барабанных классификаторах. Кроме того, необходимо учитывать, что интенсивность классификации понижается в процессе движения породы из зоны загрузочного окна в зону разгрузки, при этом концентрация частиц мелких фракций увеличивается возле центра циркуляции.

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.

МОДЕЛЬ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ-КЛАССИФИКАТОРА

Анализ существующего дробильно-сортировочного оборудования показал, что в настоящее время отсутствует специализированное оборудование для измельчения и классификации слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, но есть

оборудование (валковые прессы и барабанные грохоты), на основе конструкций которого можно создать комплексный агрегат, измельчитель-классификатор, совмещающий технологические процессы измельчения и классификации, минуя промежуточное транспортирование и конвейерную перегрузку. Способ воздействия на перерабатываемую породу и конструктивные особенности данного агрегата дают возможность использовать его как для измельчения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, так и для их классификации.

Для анализа процесса измельчения внутри барабана агрегата с помощью рабочего органа – вала-измельчителя необходимо создать расчетную модель такого процесса, которая будет соответствовать условиям деформации при разрушении пластичных материалов. Схема рабочего пространства предлагаемого устройства показана на рис. 1.

В области *A* при относительно невысоких нагрузках протекает процесс уплотнения частиц с формированием как упругих, так и пластических деформаций. На этом этапе происходит разрушение в первую очередь менее прочных фрагментов по наименее слабым сечениям или дефектам.

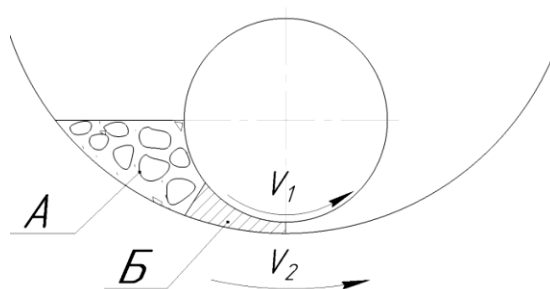


Рис. 1. Схема рабочего пространства агрегата для измельчения:

V_1 – направление касательной скорости рабочего органа – вала-измельчителя;

V_2 – направление касательной скорости рабочего органа – барабана

(*A* – область предварительного уплотнения горной породы;

B – область разрушения горной породы)

В настоящее время не существует отработанной методики определения затрат энергии на уплотнение материала, обладающего пластическими свойствами, но для решения различных задач по измельчению горных пород предложены модели расчетов, позволяющие с некоторой точностью провести оценку данного процесса. Так, модель для определения энергозатрат при уплотнении горной породы с помощью пресс-валкового агрегата для получения кубовидного щебня из сланцевой породы [6] показана на рис. 2.

Получено выражение для определения силы, действующей на ролик 1 (см. рис. 2):

$$F = \mu' rb(h+r) \left(\frac{\pi/2 - \psi}{\sin \psi} + \ln \operatorname{tg} \frac{\psi}{2} \right),$$

где r и b – радиус и длина ролика соответственно;

$$\psi = \alpha - \gamma + \beta.$$

Анализ представленного выражения позволяет получить рациональные параметры проектируемого агрегата, но основной проблемой является нахождение коэффициента, определяющего свойства материала μ' .

Используя представленное выражение и предлагаемую модель комплексного агрегата при коэффициенте μ' , полученном для сланцевой породы, была установлена сила, действующая на ролик, и изменение зазора в зоне деформации, что дало возможность оценить с некоторой точностью затраты энергии на процесс уплотнения породы. На основе анализа приведенных данных было установлено, что рассматриваемый этап потребует сравнительно невысоких затрат энергии, поэтому при моделировании он не будет учитываться.

В области B уплотненная масса интенсивно разрушается за счет пластической деформации, анализ которой будем проводить с помощью приближенного энергетического метода. Необходимая для такой деформации мощность, которая рассчитывается с помощью этого метода, незначительно превышает величину действительной мощности внутренних сил для пластического формоизменения. Следовательно, полученное на основе энергетического метода давление, действующее на рабочие поверхности агрегата, является верхней границей для действительной величины.

Рядом исследователей установлено, что в условиях всестороннего сжатия пластичные горные породы ведут себя как жестко-идеально пластичные материалы [7, 8]. Тогда процесс разрушения пластичной горной породы в области B имеет некоторое сходство с деформацией листового металла при прокатке между двумя вальцами. Следовательно, при анализе пластической деформации могут быть использованы известные зависимости, полученные для жесткого идеально-пластичного материала в условиях плоской задачи [9].

При увеличении скорости V_1 относительно скорости V_2 результирующая скорость на разрыве блоков измельчаемого материала может совпасть с вектором главных касательных напряжений. Это существенно уменьшит затраты энергии на разрушение, вследствие чего снизится давление на рабочие поверхности перфорированного барабана и вала-измельчителя [10]. Было установлено, что при отношении V_1/V_2 около трех давление на рабочие поверхности барабана снижается более чем в полтора раза.

Теоретическая модель процесса разрушения горной породы, обладающей пластическими свойствами, позволила выявить основные закономерности процесса деформирования. Поскольку ограничения модели не дают возможности оценить с достаточной точностью эффективность измельчения, для проверки полученных результатов необходимо провести лабораторные испытания на физической модели комплексного агрегата.

ЭМПИРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Теоретический анализ процесса разрушения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, выявил влияние скоростей вращения рабочих органов на силовые параметры и, следовательно, на эффективность переработки материалов измельчителем-классификатором [20]. В то же время теоретическая модель, ввиду своих ограничений, не позволяет оценить в полной мере процесс измельчения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, поэтому для проверки полученных закономерностей необходимо проведение стендовых испытаний. Для этих целей была использована принципиальная схема экспериментальной установки, показанная на рис. 4.

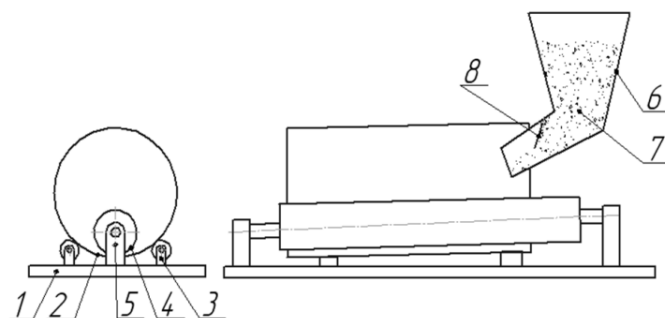


Рис. 4. Принципиальная схема экспериментальной установки

Конструкция установки для лабораторных исследований представляет собой основание 1 с установленным на роликах 3 перфорированным барабаном 2, внутри которого имеется вал-измельчитель 4, закрепленный на регулируемых опорах 5. Перфорации в барабане предназначены для отведения кондиционного измельченного продукта из зоны переработки. Дозирование исходного продукта 7 осуществляется при помощи бункера-дозатора 6 с управляемой заслонкой 8.

При проведении экспериментальных исследований использовался гипс Г2 ГОСТ125-2018, из которого в соответствии с технологией приготовления формовался брикет. Затем брикет подвергался дроблению и классификации с помощью сит. Для проведения экспериментов на комплексном агрегате использовался исходный продукт, в составе которого были частицы с размерами от 4 до 1 мм. Объем исходного продукта 0,02 м³, время его переработки за три прохода остатка в среднем 42 мин, эксперимент повторялся 10 раз. Затраты энергии на обработку пробы по результатам эксперимента составили от 0,36 до 0,63 кВт·ч. Размер частиц готового продукта составил 0,3 мм.

Для оценки эффективности исследуемого процесса необходимо учитывать полную производительность Q_{Π} , с учетом объемной производительности Q_O и производительности по готовому продукту Q_{Γ} , %:

$$Q_{\Pi} = Q_O \cdot Q_{\Gamma} / 100.$$

Кроме того, на эффективность процесса влияет размер рабочих поверхностей агрегата. Для учета этого параметра рассчитывалась удельная мощность разруше-

ния ΔW как отношение мощности W , необходимой на измельчение (измерялась лабораторным ваттметром PCE-360), к квадрату диаметра рабочего органа d :

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

Таким образом, эффективность переработки породы \mathcal{E} можно оценить как отношение удельной мощности ΔW к полной производительности процесса Q_{Π} :

$$\mathcal{E} = \Delta W / Q_{\Pi}.$$

Для измерения необходимой на измельчение электрической мощности при проведении лабораторных исследований на экспериментальной установке использовался ваттметр лабораторный PCE-360.

При проведении измерений электрической мощности требуется учитывать потери в передаточных механизмах установки, на основе предварительного анализа общий КПД экспериментальной установки был около 0,6. Точнее полученную величину устанавливать не требуется, так как методика измерений основывается на сравнении.

Измерения необходимой для измельчения мощности проводились на условиях наибольшей производительности, полученной на испытаниях. При теоретическом анализе процесса разрушения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, было выявлено, что на рабочих поверхностях агрегата давление q наименьшее. Следовательно, минимальные затраты энергии при измельчении наблюдаются при соотношениях касательных скоростей вала-измельчителя и перфорированного барабана в интервале 2/1–3/1. В этом диапазоне проводились экспериментальные исследования, результаты которого показаны на рис. 5.

На основе анализа результатов эмпирического исследования влияния отношения величин касательных скоростей вала-измельчителя V_1 и перфорированного барабана V_2 было выявлено, что при их соотношении около 2,3/1 эффективность процесса измельчения для лабораторной установки увеличивается на 30 %.

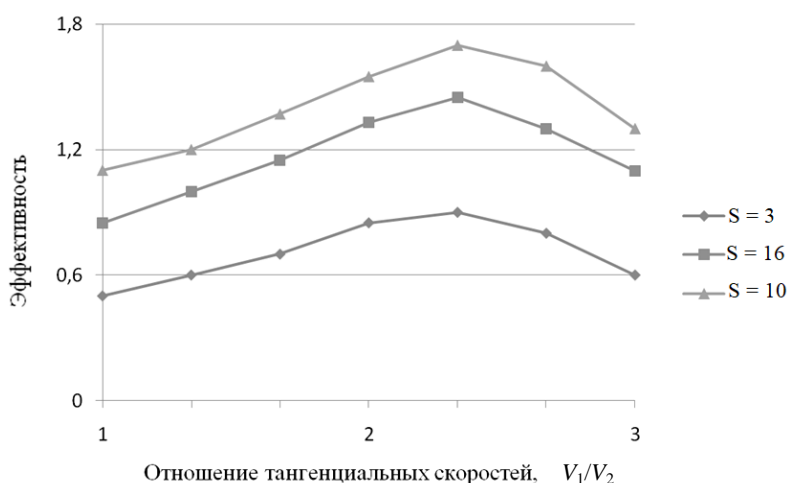


Рис. 5. Зависимость эффективности измельчения от отношения V_1 к V_2 при различных значениях технологического зазора между барабаном и валом-измельчителем S

Было установлено, что наиболее эффективным будет процесс измельчения при 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 значительно увеличиваются затраты энергии на измельчение. При технологическом зазоре 16 мм снижается выход готового продукта (уменьшается Q_r), но при этом сокращаются и затраты энергии на измельчение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная теоретическая модель разрушения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, основанная на энергетическом методе расчета контактных давлений, позволяет осуществлять теоретический анализ процесса измельчения, что обеспечивает при проектировании измельчительного оборудования выявление наиболее эффективных параметров рабочих поверхностей агрегатов, а также оптимальных режимов переработки.

Представленный подход, основанный на теоретическом анализе принятой модели, позволит на этапе проектирования нового агрегата выявить ведущие закономерности технологического процесса переработки, что обеспечит получение наиболее эффективных решений. Анализ результатов, полученных на основе теоретических исследований, выявил, что при соотношении касательных скоростей вала-измельчителя и перфорированного барабана $V_1 = 3V_2$, давление на рабочие поверхности измельчителя-классификатора может снижаться до 1,5 раза. Это позволит существенно снизить энергозатраты на измельчения.

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.

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. Процессы и машины. М.: Горная книга, 2012. Т. 1. 424 с.
3. Донченко А.С., Донченко В.А. Справочник механика рудообогатительной фабрики. М.: Недра, 1986. 543 с.
4. Хопунов Э.А. Формализация факторов управляемого разрушения в процессах рудоподготовки // *Современные научные исследования и инновации*. 2020. № 1. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2020/01/91114> (дата обращения: 09.04.2025).
5. Бибилов П.Я., Бардовский А.Д., Митусов П.Е., Калакуцкий А.В. Разработка конструкции измельчителя-классификатора для переработки слабых горных пород // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015. № 3. С. 233–237.
6. Романович А.А., Романович М.А., Чеховской Е.И. Расчет усилия, необходимого для создания направленного движения сланцевых материалов в пресс-валковом агрегате // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018. № 8. С. 131–137.

7. Мажитов А.М., Корнеев С.А., Бондарь Е.А., Шаронова А.А. Оценка напряженно-деформированного состояния массива при отработке запасов в техногенно-осложненных условиях // *Актуальные проблемы горного дела*. 2017. № 2 (4). С. 19–26.

8. Маковкин Г.А., Лихачева С.Ю. Применение МКЭ к решению задач механики деформируемого твердого тела. Нижний Новгород: изд-во ННГАСУ, 2012. 73 с.

9. 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.

10. 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.

Для цитирования: Горлов И.В., Митусов П.Е. Анализ эффективности агрегата для комплексной переработки горных пород, обладающих пластическими свойствами // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 3 (27). С. 93–102.

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF THE UNIT FOR THE COMPLEX PROCESSING OF ROCKS WITH PLASTIC PROPERTIES

I.V. GORLOV¹, Dr. Sc., P.E. MITUSOV², Cand. Sc.

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

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

The article presents an analysis of typical units for classification and grinding of materials. A new type of complex unit is proposed, which can be used for processing weak materials with significant plastic properties. The proposed unit will allow both grinding and classification of the studied rocks within a single cycle, excluding additional transportation and intermediate storage of the processed product. An original design of a complex unit - a grinder-classifier is proposed, and its operating principle is described. Some elements of engineering calculations for determining the most important process parameters in the processing of rocks with significant plastic properties are also presented. The paper presents the results of the analysis of the growth of process efficiency when using a grinder-classifier for processing weak rocks with significant plastic properties.

Keywords: grinding, classification of rocks, energy method, shear stresses, grinder shaft, perforated drum, efficiency.

Поступила в редакцию/received: 05.05.2025; после рецензирования/revised: 07.05.2025;
принята/accepted: 12.05.2025