

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 622.7

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-169-181

АНАЛИЗ И ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ РУДЫ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Махно Николай Артемович *, Федотов Павел Константинович

Иркутский национальный исследовательский технический университет

* для корреспонденции: Makhno_N_A@mail.ru



Информация о статье

Поступила:

26 декабря 2024 г.

Одобрена после
рецензирования:

10 июня 2025 г.

Принята к публикации:

20 июня 2025 г.

Опубликована:

26 июня 2025 г.

Ключевые слова:

моделирование, роллер-пресс,
разрушение руды,
дизинтеграция,
испытательная капсула
межчастичного разрушения,
метод конечных элементов
(МКЭ), селективное
измельчение

Аннотация.

Актуальность работы обусловлена возрастающим мировым спросом на минеральные ресурсы и необходимостью разработки более эффективных методов обработки рудных материалов. Снижение энергозатрат на этапах обогащения и улучшение качества дробления достигается путем применения современных технологий, таких как роллер-прессы, для более эффективного измельчения руд. Эти технологии способствуют повышению производительности и снижению воздействия на окружающую среду, что делает их крайне важными для устойчивого развития горной промышленности.

Данная работа посвящена анализу существующих методов моделирования процесса разрушения руды в роллер-прессе. В статье рассматриваются математическое моделирование с использованием метода конечных элементов (МКЭ) и физическое моделирование в испытательных капсулах для воспроизведения условий реального процесса измельчения.

Основные действия включают анализ существующих подходов, разработку схемы моделирования объемного разрушения, а также проведение экспериментов с медной рудой, включающих силовой анализ и определение сходимости гранулометрического состава, полученного в ходе лабораторного эксперимента, с гранулометрическим составом разгрузки роллер-пресса. Эти исследования направлены на улучшение понимания механизма межчастичного разрушения и оптимизацию параметров работы роллер-пресса, что позволит повысить эффективность процессов дробления и снизить энергозатраты на последующие этапы обогащения.

Для цитирования: Махно Н.А., Федотов П.К. Анализ и опыт моделирования процесса разрушения руды в лабораторных условиях // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 3 (169). С. 169-181. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-169-181, EDN: NDRERN

Введение. Процесс эффективного обогащения полезных ископаемых требует тщательной дезинтеграции исходного материала с целью минимизации количества срастков и максимизации количества свободных зерен минералов. Достижение селективного измельчения имеет ключевое значение, так как это снижает энергетические затраты на дальнейшие этапы обогащения. С ростом мирового спроса на минеральные ресурсы возрастает необходимость разработки более

эффективных методов обработки рудных материалов.

В последние годы в горной промышленности активно внедряются новые технологии измельчения, включая использование роллер-прессов – валковых дробилок высокого давления. В отличие от традиционных методов дробления, роллер-прессы обеспечивают измельчение руды в слое частиц под давлением, что приводит к снижению энергозатрат и повышению эффективности процесса [1], [2]. Технология HPGR уже нашла широкое

применение при обработке таких материалов, как медные и железные руды, известняки и кимберлиты, демонстрируя значительные преимущества по сравнению с традиционными методами [3].

При разрушении руды в роллер-прессе измельчение происходит в слое материала. Вновь образовавшиеся частицы воздействуют друг на друга, разрушая соседние, с меньшей потенциальной энергией. Этот процесс в роллер-прессе осуществляется при давлении одного поджимающего вала, который вращается синхронно с другим.

Кроме того, Wang C. и др. [4] провели сравнительный анализ экономической и энергетической эффективности использования роллер-прессов (HPGR) и традиционных схем измельчения (SABC) на примере Huckleberry Mine. Исследования показали, что HPGR обеспечивает снижение энергозатрат на 20-30% по сравнению с SABC, а также уменьшает эксплуатационные расходы благодаря более равномерному гранулометрическому составу продукта. Это делает технологию роллер-прессов предпочтительной для модернизации существующих предприятий.

Однако, несмотря на очевидные преимущества, остаются нерешенные вопросы, связанные с оптимизацией параметров работы роллер-прессов для различных типов руды и условий обработки [5]. Моделирование процессов разрушения в таких системах может помочь не только глубже понять механизмы дезинтеграции, но и предложить эффективные способы снижения энергозатрат [6].

Цель настоящей статьи – проанализировать существующие подходы к моделированию процесса разрушения руды в роллер-прессе, обобщить результаты последних исследований в этой области, а также испытать собственную схему моделирования объемного разрушения в роллер-прессе для улучшения понимания механизмов межчастичного разрушения.

Основная часть. Анализ методов моделирования разрушения руды в роллер-прессе требует детального рассмотрения современных технологий, применяемых в горнодобывающей промышленности. Роллер-прессы, являющиеся частью оборудования для высокоэффективного измельчения, обеспечивают измельчение рудного материала в слое частиц под высоким давлением, что существенно снижает энергозатраты и улучшает гранулометрический состав конечного продукта. Эти устройства используются для обработки различных типов руды, включая медные, железные и золотые руды, известняки и кимберлиты [7].

При всех преимуществах исследователи выделяют и определенные проблемы данного способа. Так, среди недостатков можно отметить

значительную зависимость процессов дробления от таких свойств пород, как твердость и абразивность.

Зависимость эффективности дробления от свойств пород, таких как твердость, прочность и абразивность, является одним из ключевых факторов, влияющих на работу роллер-прессов. Как показано в исследовании Э. А. Хопунова [8], высокоабразивные породы, такие как кварциты и некоторые медные руды, приводят к ускоренному износу валков роллер-пресса. Это в свою очередь снижает эффективность работы оборудования и увеличивает затраты на его обслуживание.

В работе Дж. Линча [9] было установлено, что для более твердых пород, таких как граниты и базальты, требуется более высокое давление в роллер-прессе. Однако чрезмерное давление может привести к неравномерному разрушению частиц, увеличению выхода крупных фракций и снижению селективности дезинтеграции. В подобных условиях существует риск разрушения самой матрицы руды, что затрудняет последующее выделение ценных компонентов.

Кроме того, влажность руды также оказывает значительное влияние на эффективность работы роллер-пресса. Как показано в работе Ревнивцева и соавторов [10], повышенная влажность материала может привести к агломерации частиц, что затрудняет их разрушение и снижает эффективность процесса [11].

Работа Hilden и Powell [12] показала, что форма частиц играет ключевую роль в эффективности разрушения рудного материала. Частицы с высокой степенью угловатости демонстрируют более высокий уровень межчастичного разрушения, так как создают точки концентрации напряжений. В условиях роллер-пресса частицы с округлой формой склонны к пластическому деформированию, что снижает эффективность разрушения и увеличивает энергозатраты. Учет этого фактора позволяет точнее прогнозировать поведение материала и оптимизировать параметры работы роллер-пресса.

С учетом этих факторов определение параметров дезинтеграции и оптимизация условий работы роллер-прессов требует проведения детализированных исследований. В лабораторных условиях выполнение таких исследований может быть значительно более быстрым и дешевым способом, позволяющим точно определить влияние этих факторов на эффективность дробления. Моделирование процессов разрушения руды в таких условиях позволяет не только сэкономить ресурсы, но и ускорить процесс разработки и оптимизации технологических параметров, что в дальнейшем способствует повышению производительности и снижению затрат на стадии промышленного измельчения.

Математическое моделирование разрушения руды в роллер-прессе основывается на теоретических концепциях деформации и разрушения материалов, включая теории упругости, пластичности и энергетические критерии разрушения. Эти модели позволяют описать межчастичное взаимодействие в условиях высокопрочного сжатия, предсказывая поведение руды на разных стадиях измельчения [13]. Одним из наиболее эффективных методов для этого является метод конечных элементов (МКЭ), который численно решает уравнения деформации и разрушения, минимизируя функционал потенциальной энергии. МКЭ позволяет анализировать распределение напряжений и деформаций, взаимодействие частиц и оптимизировать параметры работы роллер-пресса без необходимости проведения физических экспериментов [14].

Современные исследования, такие как работы Zienkiewicz и Taylor [15], подчеркивают важность адаптации методов конечных элементов к задачам горнодобывающей промышленности. Эти подходы включают моделирование сложных физических явлений, таких как нелинейное поведение материалов, учет трения между частицами и динамических эффектов при сжатии.

Использование МКЭ в моделировании разрушения руды достигло нескольких значительных результатов, таких как оптимизация осевой силы давления, предсказание гранулометрического состава продукта, определение зоны эффективного сжатия и снижение энергопотребления. Метод также показал свою универсальность, поскольку соотношение потенциальной энергии деформации не зависит от типа породы, что позволяет применять его для различных типов руд [16].

Исследования Cleary и др. [17] показывают, что использование метода дискретных элементов (DEM) значительно улучшает понимание процессов межчастичного взаимодействия в роллер-прессах. DEM позволяет анализировать микромеханические явления, такие как распределение контактных сил, динамика разрушения частиц и образование мелких фракций. Важным результатом применения этого метода является возможность визуализации движения частиц внутри прессового механизма, что упрощает оптимизацию работы оборудования в промышленных условиях.

Физическое моделирование помогает восполнить недостатки математического и уточнить параметры, которые невозможно предсказать только математическими методами.

Физическое моделирование разрушения рудных материалов является ключевым этапом для изучения процессов межчастичного взаимодействия в роллер-прессе. Прессовые

испытательные машины, используемые в данном исследовании, позволяют воспроизвести реальные условия объемного сжатия, которые имеют место в промышленном роллер-прессе. Такие эксперименты дают возможность изучать поведение различных типов руды под воздействием высокого давления и глубже анализировать процессы дезинтеграции материала.

Экспериментальный процесс физического моделирования разрушения рудных материалов начинается с подготовки образцов, которые помещаются в специальную емкость – испытательную капсулу межчастичного разрушения (ИКМР). Эта капсула представляет собой металлический сосуд с толстостенными стенками и круглым сечением, что позволяет выдерживать высокие давления в условиях объемного сжатия [18]. После заполнения капсулы материал сдавливается в замкнутом объеме с помощью поршневого пресса. Полученный сжатый брикет затем освобождается и подвергается дезинтеграции. Этот процесс моделирует реальное межчастичное разрушение руды, происходящее в роллер-прессе.

После завершения экспериментов гранулометрический состав продукта анализируется с использованием методов ситового анализа с целью определить долю мелких фракций и крупности частиц в зависимости от давления. Энергозатраты на дезинтеграцию рассчитываются на основе работы прессового механизма, а полнота раскрытия ценных компонентов оценивается с применением микроскопического анализа полученных образцов.

Полученные закономерности нагружения и деформации позволяют не только оценить изменение свойств минеральных материалов в зависимости от величины и скорости нагружения, но и предложить критерии для выбора оптимальных параметров работы измельчительных установок.

Процесс разрушения геоматериала в условиях объемного нагружения можно разделить на несколько этапов, которые зависят от внутренних характеристик материала и приложенных сил:

- На начальной стадии происходит краевое или объемное разрушение крупных частиц, что связано с внутренней дефектностью зерен исходного класса и неоднородностью их структуры;

- По мере увеличения давления начинается накопление мелкой фракции. Эта мелкая фракция накапливается до достижения критической массы, при которой крупные фракции еще сопротивляются разрушению.;

- При дальнейшем увеличении давления мелкая фракция начинает активно включаться в

процесс разрушения. Происходит уплотнение частиц до предельного значения, сопровождаемое внутрикристаллическим разрушением [19].

Для определения деформационных изменений необходимо осуществлять непрерывную регистрацию нагрузок и деформаций. Диапазон нагрузок от 10 до 100 т или более позволяет исследовать поведение различных типов руд, от менее прочных до высокопрочных, что дает возможность детально изучить закономерности разрушения и дезинтеграции материала в зависимости от уровня давления.

В результате проведенных испытаний [19] было установлено, что в зоне объемного сжатия происходит интенсивное раскрытие новых поверхностей, при этом минеральные частицы демонстрируют свои предельные механические характеристики. Испытания позволили выявить наиболее и наименее прочные образцы. Наиболее прочной оказалась массивная кристаллическая руда с неравномерной структурой, что связано с ее высокой устойчивостью к межчастичному разрушению.

В случае сплошной руды дезинтеграция-консолидация происходит несколько иначе. Под воздействием объемного сжатия начинается разрушение агрегатов, что приводит к заполнению промежутков между ними обломками разрушенных зерен. По мере увеличения давления формируются трансформные магистральные трещины, которые становятся основным механизмом разрушения. Рост этих трещин ускоряется с увеличением нагрузки, что приводит к дальнейшему разрушению материала.

Полученные результаты являются важным шагом для дальнейшей оптимизации условий работы роллер-пресса, поскольку они позволяют предсказать поведение различных типов руды при изменении технологических параметров, таких как давление и время воздействия, что, в свою очередь, может снизить энергозатраты и улучшить качество дробления.

Исследования подтверждают высокую эффективность использования роллер-прессов для измельчения руды. Моделирование процессов разрушения показывает, что использование таких прессов позволяет оптимизировать дезинтеграцию рудных материалов, опираясь на основные принципы рациональной дезинтеграции, сформулированные ранее [20].

Основные принципы рациональной дезинтеграции включают:

- Силовое воздействие на куски материала в объемной массе, достижение оптимального разрушения важно, чтобы материал подвергался разнонаправленным локальным нагрузкам, которые возникают в объеме руды. Эти нагрузки позволяют равномерно распределить усилия, что способствует более эффективному разрушению крупных фракций;

- Соответствие нагрузки и прочности межфазных границ, т. к. эффективное разрушение происходит, когда приложенные нагрузки соразмерны прочности дефектных зон и межфазных границ. Это обеспечивает селективное разрушение более слабых связей между зернами минералов, что способствует улучшению гранулометрического состава конечного продукта;

- Для улучшения процесса измельчения важно, чтобы в промежутках между циклами нагрузки куски материала сохраняли некоторую подвижность. Это позволяет им переориентироваться и увеличить количество межчастичных взаимодействий, что ведет к более равномерному измельчению и снижению энергозатрат [10].

Помимо вышеупомянутых исследований, значительный вклад в изучение процессов объемного разрушения руды в роллер-прессе внес Федотов П. К. Его работы стали важным шагом вперед в понимании механизмов межчастичного взаимодействия и оптимизации условий работы роллер-прессов. Федотов провел серию экспериментов, направленных на сравнение традиционных схем рудоподготовки с новыми методами, основанными на объемном разрушении в роллер-прессах. Результаты его исследований показали существенные преимущества использования роллер-прессов по сравнению с традиционными технологиями.

В ходе его работы было выполнено моделирование с использованием испытательной капсулы межчастичного разрушения (ИКМР) и традиционных аппаратов, что позволило определить рабочий индекс Бонда для различных схем рудоподготовки.

Сравнительный анализ этих данных показал, что использование роллер-пресса для межчастичного разрушения руды позволяет снизить энергозатраты на стадии шарового измельчения на 30% по сравнению с традиционной технологией рудоподготовки. Это является важным достижением, так как более высокая доля мелкого класса (на 6,5% больше по сравнению с традиционными методами) значительно улучшает эффективность последующих стадий обогащения и снижает общий расход энергии [18].

Таким образом, на сегодняшний день существует значительное количество исследований, в которых подробно описывается процесс моделирования разрушения руды в роллер-прессах с использованием как физического, так и математического подхода. Анализ и систематизация этих работ позволили обобщить основные выводы и выделить ключевые характеристики, которые определяют эффективность разрушения руды при применении роллер-прессов. Одним из главных выводов является то, что использование роллер-прессов демонстрирует существенные преимущества по сравнению с традиционными схемами рудоподготовки. Эти преимущества включают значительное снижение энергозатрат и улучшение гранулометрического состава конечного продукта, что делает технологию более энергоэффективной и перспективной для дальнейшей оптимизации.

Несмотря на достигнутые успехи, существует

необходимость в дальнейших исследованиях, направленных на разработку методики, которая позволит с большей точностью определять оптимальные параметры объемного разрушения, что откроет возможность разработки инструментов для точного подбора роллер-пресса и его рабочих параметров еще на этапе лабораторных испытаний, и значительно сократить необходимость в полупромышленных тестах, повысив общую рентабельность технологического процесса.

На основании проведенного обзора было решено провести собственное исследование моделирования объемного разрушения в роллер-прессе с применением традиционных аппаратов, для данного опыта была подготовлена медная руда, химический и минеральный состав которой представлены в Таблице № 1 и 2:

Определяющим параметром при проведении лабораторных испытаний являются затраты энергии на дробление образца при

Таблица 1. Химический состав руды

Table 1. Chemical composition of ore

Элемент, компонент	Массовая доля, %
SiO_2	53,0
Al_2O_3	15,0
CaO	4,0
K_2O	2,5
Na_2O	1,0
MgO	6,5
MnO	0,3
P_2O_5	0,1
TiO_2	0,5
Fe общ	6,5
Fe сульфид	1,0
Fe окисл	5,5
S общ	1,0
Cu	0,30
Mo	0,004

Таблица 2. Минеральный состав руды

Table 2. Mineral composition of ore

Минерал, группа минералов	Массовая доля, %
Породообразующие минералы	
Кварц	21,0
Хлорит	24,0
Слюда (мусковит, серицит)	22,0
Полевые шпаты (калиевые полевые шпаты, плагиоклазы)	19,0
Амфиболы	1,0
Карбонаты (кальцит, доломит)	5,0
Рудные минералы	
Пирит	1,6
Халькопирит	0,9
Молибденит	ед. зн.
Оксиды и гидроксиды Fe	4,0
Акцессорные минералы	
Минералы титана, эпидот, ильменит, рутил, барит, апатит, циркон, гранаты	1,5
Итого	100,0

Таблица 3. Распределение энергии на дробление по зонам при моделировании
Table 3. Distribution of energy for crushing by zone during modeling

Энергозатраты при моделировании в лабораторных условиях	Затраты энергии на дробление в данной зоне, %	Затраты энергии на дробление в данной зоне, кВт/тонна	Затраты энергии на дробление в данной зоне, кВт/кг	Объем продукта, %
Зона предварительного давления <i>Щековая дробилка</i>	10,715	0,300	0,0003	97
Центральная зона <i>Гидравлический пресс</i>	73,215	2,050	0,00205	90
Краевые зоны <i>Валковая дробилка</i>	16,070	0,450	0,00045	7
Недробленая руда	0	0,000	0	3
Итого	100	2,800	0,0028	100

моделировании какой-либо зоны роллер-пресса. Для оценки распределения энергозатрат была использована схема моделирования работы роллер-пресса в лабораторных условиях, основанная на поэтапном дроблении руды с использованием традиционных аппаратов (щековых и валковых дробилок), что позволяет воспроизвести условия объемного разрушения, аналогичные промышленному роллер-прессу:

Зона предварительного давления – моделируется с использованием щековой дробилки, которая обеспечивает начальную дезинтеграцию материала.

Центральная зона давления – воспроизводится с помощью испытательной капсулы межчастичного разрушения (ИКМР), где образец подвергается осевому давлению.

Краевые зоны давления – моделируются на валковой дробилке, работающей с зазором, равным зазору промышленного роллер-пресса.

Распределение энергозатрат в лабораторной схеме представлено в Таблице 3. Лабораторная схема, позволяющая промоделировать как центральную зону давления роллер-пресса, так и зону предварительного давления, краевую зону, изображена на Рис. 1.

Таким образом, от исходной руды отбирается 2-4% для моделирования просыпей (продукт 2), 96-98% исходной руды дезинтегрируется в щековой дробилке с шириной щеки, равной среднему диаметру зерна (продукт 3). Полученный после дезинтеграции материал (продукт 4) делится в соотношении 90% и 6-8% (продукт 5 и 6 соответственно). Основная масса (продукт 5, 90%) отправляется в ИКМР для моделирования центральной зоны роллер-пресса, оставшиеся 6-8% дезинтегрированной руды (продукт 6) измельчаются в валковой дробилке рабочим зазором, равным зазору в роллер-прессе (в текущем опыте 15 мм), полученные в ходе исследования ситовые характеристики продуктов представлены в Таблице 5. Данные действия можно разбить на следующие шаги:

1. От исходной руды отбирается проба массой 2-4% (продукт 2) для моделирования просыпей. Остальные 96-98% исходной руды направляются на предварительную дезинтеграцию в щековой дробилке.

2. Руда подвергается обработке в щековой дробилке с шириной щек, соответствующей среднему диаметру зерна. Полученный материал маркируется как продукт 3.

3. Продукт 3 делится на две фракции в соотношении 90% и 6-8% (продукты 5 и 6 соответственно).

4. Основная часть (продукт 5) направляется для моделирования центральной зоны давления роллер-пресса.

5. Оставшаяся часть (продукт 6) используется для дальнейшего измельчения в валковой дробилке.

6. Продукт 5 загружается в испытательную капсулу межчастичного разрушения (ИКМР), имеющую диаметр 100 мм. Масса навески рассчитывается на основе объема цилиндра и удельного веса материала так, чтобы высота зазора в ИКМР после приложения нагрузки соответствовала ширине зазора в роллер-прессе. Для эксперимента расчетная масса навески составила 318 г, что соответствует 15 мм ширине зазора в роллер-прессе.

7. Во время процесса дезинтеграции в ИКМР фиксируются следующие параметры: общая сила давления (кН), скорость движения поршня (мм/с), удельная сила давления (Н/мм²), давление в зоне сжатия (МПа).

8. После окончания цикла сжатия образец извлекается из капсулы и подвергается ситовому анализу для определения гранулометрического состава.

9. Образец возвращается в ИКМР для повторного исследования, чтобы построить два графика гранулометрических характеристик (Рис. 3), минимизируя влияние недостаточного давления на лабораторном оборудовании.

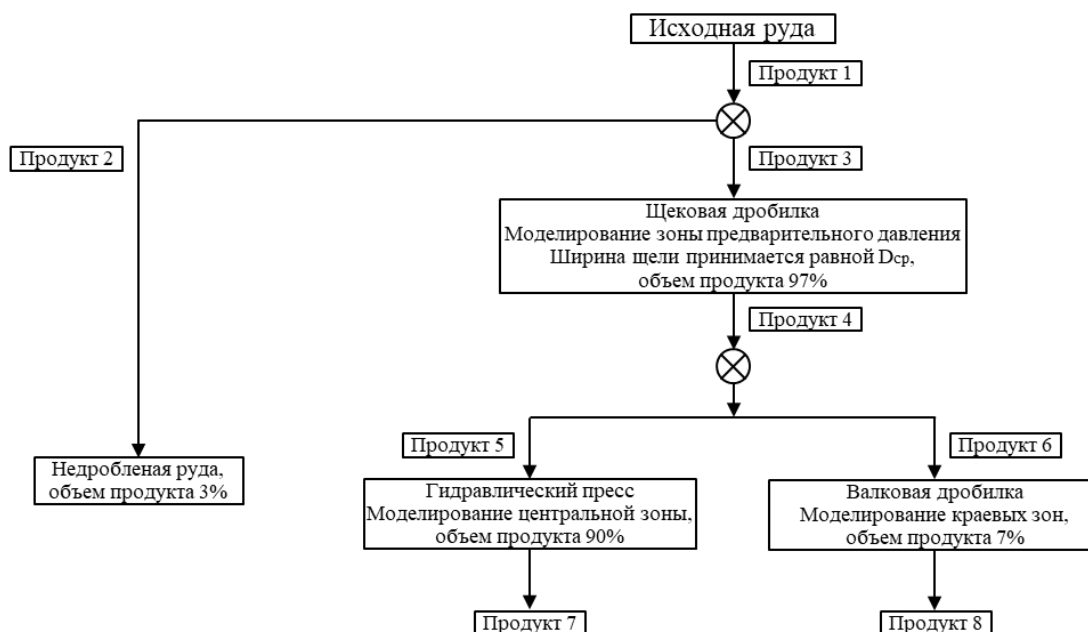


Рис. 1. Схема аппаратов для моделирования работы роллер-пресса
Fig. 1. Diagram of apparatus for simulating the operation of a roller press

Таблица 4. Характеристика исходного питания
Table 4. Characteristics of the initial power supply

Наименование параметра	Значение
Максимальный кусок, мм	50
Содержание класса -5 мм, %	8,28
Удельный вес, г/см ³	2,7
Насыпной вес, г/см ³	1,5

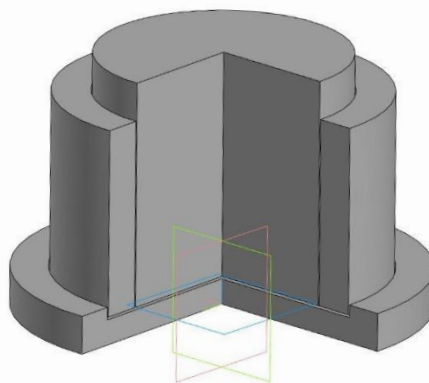


Рис. 2. Испытательная капсула межчастичного разрушения
Fig. 2. Interparticle fracture test capsule

10. Продукт 6 измельчается в валковой дробилке с рабочим зазором, равным зазору в роллер-прессе (в данном исследовании 15 мм).

11. Продукты 2, 7 и 8 объединяются в соотношении, соответствующем методике эксперимента. Полученная шихта формирует

новый продукт, по которому определяется итоговая гранулометрическая характеристика.

12. Исходное питание с гранулометрическим составом, соответствующим лабораторному опыту, дезинтегрируется в роллер-прессе.

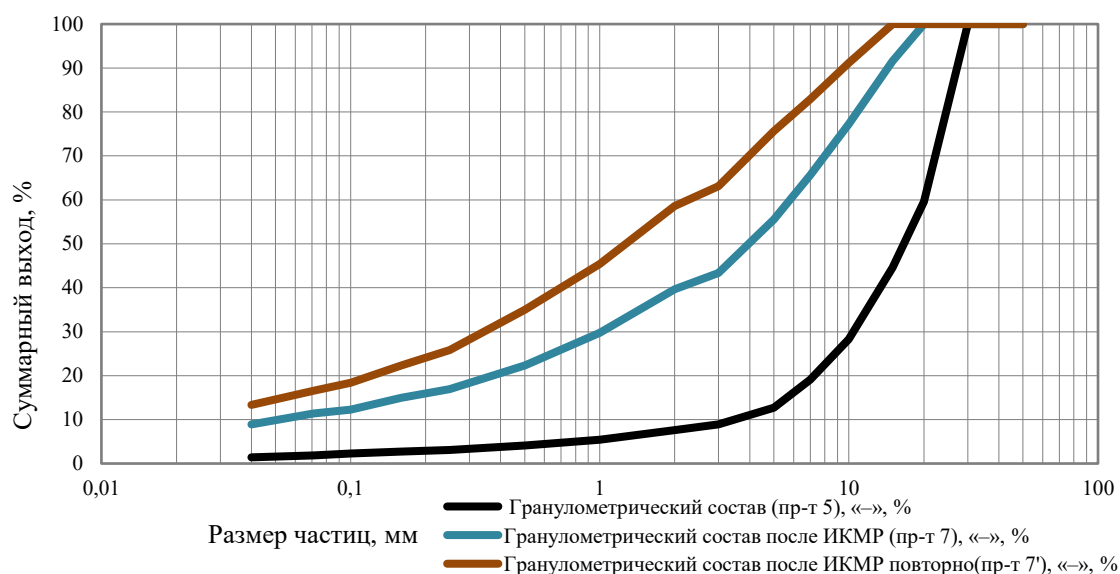


Рис. 3. Гранулометрические характеристики: проб питания и выгрузки ИКМР

Fig. 3. Granulometric characteristics: feed and discharge samples ICMR

Таблица 5. Гранулометрические характеристики исходных и дробленных продуктов в соответствии со схемой, изображенной на Рис. 1

Table 5. Granulometric characteristics of the original and crushed products in accordance with the scheme shown in Fig. 1.

Размер частиц, мм	Продукт 1-3, %	Продукт 4, %	Продукт 5, %	Продукт 6, %	Продукт 7', %	Продукт 8, %	Продукт (3/7/90), %
-50+40	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
-40+30	96,83	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,91
-30+20	80,24	96,74	96,73	96,79	100,00	100,00	99,41
-20+15	46,89	59,61	59,49	61,23	100,00	89,99	97,71
-15+10	33,92	44,57	44,70	42,71	100,00	73,04	96,13
-10+7	21,24	28,18	28,27	27,04	91,18	41,58	85,61
-7+5	13,56	19,03	19,08	18,27	82,90	26,59	76,88
-5+3	8,28	12,62	12,65	12,14	75,65	18,14	69,60
-3+2	6,13	8,80	8,83	8,49	63,11	12,12	57,83
-2+1	5,06	7,49	7,51	7,23	58,61	10,52	53,64
-1+0,5	3,66	5,31	5,32	5,14	45,40	7,19	41,47
-0,5+0,25	2,77	4,06	4,06	3,94	35,00	5,47	31,97
-0,25+0,16	2,08	3,02	3,03	2,95	25,83	4,06	23,59
-0,16+0,1	1,72	2,62	2,62	2,57	22,30	3,58	20,37
-0,1+0,071	1,43	2,23	2,23	2,20	18,42	3,05	16,83
-0,071+0,04	1,15	1,87	1,87	1,85	16,55	2,71	15,12
-0,04	0,81	1,41	1,41	1,41	13,35	2,12	12,18

13. По полученным гранулометрическим составам (п. 11 и п. 12) строятся и анализируются графики суммарного выхода.

Подробная схема традиционных аппаратов для моделирования работы роллер-пресса

представлена на Рис. 1 [18], характеристики исходного питания представлены в Таблице 4, полученные в ходе исследования ситовые характеристики продуктов представлены в Таблице 5.

Имеющийся в лаборатории ИрНITU гидравлический пресс позволяет прикладывать к образцу нагрузку в диапазоне до 600кН, регулировать скорость увеличения нагрузки, а также фиксирует следующие параметры: общая сила давления в кН, скорость движения поршня в

мм, удельная сила давления в Н/мм², давление в зоне сжатия МПа.

Для проведения исследования были установлены следующие параметры: общая сила давления 600кН, скорость движения поршня 1 мм/с. Полученный продукт извлекался из ИКМР

Таблица 6. Технические характеристики роллер-пресса

Table 6. Technical characteristics of the roller press

Наименование параметра	Значение
Тип	52/10-230
Диаметр валка, мм	1000
Ширина валка, мм	230
Скорость валка, об/мин	рег. до 27,8
Удельная сила давления, Н/мм ²	рег. до 8
Общая сила давления, кН	рег. до 1150
Мощность привода, кВт	2x132
Крупность питания, мм	<40

Таблица 7. Результаты теста в роллер-прессе

Table 7. Roller press test results

Наименование параметра	Значение
Крупность питания, мм	<50
Скорость валков, об/мин	10,7
Окружная скорость валков, м/с	0,56
Целевая удельная сила давления, Н/мм ²	3,50
Удельная пропускная способность, (т·с)/(ч·м ³)	190
Пропускная способность, т/ч	24
Удельная энергия, кВт·ч/т	2,9
Рабочий зазор, мм	15
Масса продукта -5 мм, %	66,69

Таблица 8. Гранулометрическая характеристика продуктов дробления

Table 8. Granulometric characteristics of crushed products

Размер частиц, мм	Суммарный выход «-», %		
	Питание роллер-пресса / питание схемы моделирования	Разгрузка роллер-пресса	Разгрузка схемы лабораторного моделирования
-50+40	100,00		100,00
-40+30	96,83	100,00	99,91
-30+20	80,24	99,89	99,41
-20+15	46,89	98,43	97,71
-15+10	33,92	95,54	96,13
-10+7	21,24	84,72	85,61
-7+5	13,56	74,69	76,88
-5+3	8,28	66,69	69,60
-3+2	6,13	55,37	57,83
-2+1	5,06	48,29	53,64
-1+0,5	3,66	38,80	41,47
-0,5+0,25	2,77	32,29	31,97
-0,25+0,16	2,08	26,52	23,59
-0,16+0,1	1,72	23,18	20,37
-0,1+0,071	1,43	20,14	16,83
-0,071+0,04	1,15	17,68	15,12
-0,04	0,81	13,56	12,18

и подвергался ситовому анализу, после чего возвращался в ИКМР для достижения необходимых гранулометрических характеристик (Рис. 3), снижая влияние недостаточного давления (напряжение сжатия составило 76,4 МПа) в лабораторном оборудовании относительно промышленного роллер-пресса.

Для подтверждения возможности моделирования объемного разрушения в роллер-прессе с помощью традиционных аппаратов в лабораторных условиях был поставлен опыт на промышленном роллер-прессе производства компании Кёрреп (Германия). В Таблице 5 представлены основные технические характеристики роллер-пресса, в Таблице 6 представлены результаты, полученные при дезинтеграции медной руды в роллер-прессе, при этом питание роллер-пресса полностью соответствовало гранулометрическому составу продукта 1.

Полученный продукт разгрузки роллер-пресса исследовался на гранулометрический состав и сравнивался с данными, полученными в ходе лабораторных опытов. Гранулометрический состав полученных продуктов дробления представлен в Таблице 7.

На Рис. 4 построены графики гранулометрических характеристик, полученных в ходе эксперимента.

Графики в целом близки друг к другу с небольшой средней абсолютной разницей 1.86 и относительной погрешностью 5.96%. Максимальная ошибка составила 5.36, что показывает наличие отдельных точек, где отклонения значительны, что может быть вызвано аномалиями или локальными особенностями данных. Средняя процентная ошибка 2.06%, показатель ниже относительной

погрешности, что говорит о слабо выраженном общем отклонении.

Определенные различия в выходе мелких классов (-0,5 мм), вероятнее всего, связаны с недостаточным пиковым напряжением сжатия – 76,4 МПа, с учетом данного фактора можно выделить следующие дальнейшие шаги развития данного исследования:

- 1) Увеличение пикового давления сжатия в лабораторной установке за счет уменьшений площади сдавливания (снизится масса пробы) или более мощного лабораторного оборудования для увеличения выхода мелких классов с целью дальнейшего повышения сходимости.
- 2) Количественная наработка проб, дезинтегрированных в ИКМР для формирования массива данных.
- 3) Проведение лабораторных исследований с другими типами руд.
- 4) Проверка вскрытия минералов на лабораторном микроскопе.
- 5) Проверка обогатимости с помощью флотации.
- 6) Дополнение методики шагами, позволяющими спроецировать энергозатраты с лабораторного метода на промышленный.
- 7) Построение математической модели объемного разрушения руд в ИКМР с целью изучения механизма процесса.

Выводы. Проведенный литературный обзор позволил систематизировать и классифицировать методы моделирования объемного разрушения руды в роллер-прессе. Это создало теоретическую основу для дальнейших практических исследований.

Разработана физическая модель разрушения руды в межчастичном слое роллер-пресса с применением традиционного лабораторного

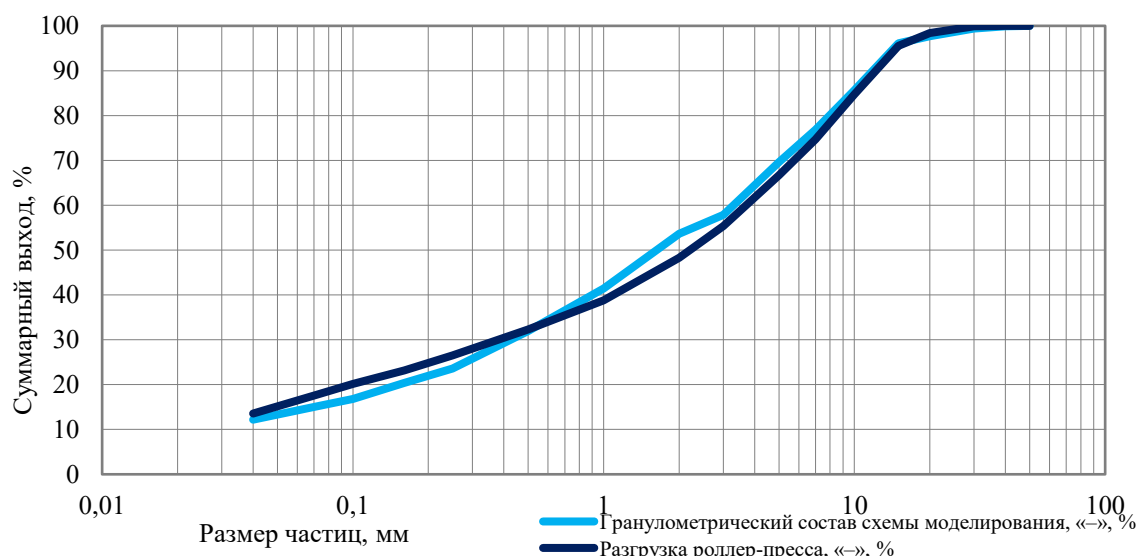


Рис. 4. Гранулометрические характеристики разгрузки роллер-пресса и лабораторной установки
Fig. 4. Granulometric characteristics of roller press unloading and laboratory installation

оборудования: гидравлического пресса, щековой и валковой дробилки. На основе разработанной модели выполнено исследование объемного разрушения медной руды в роллер-прессе, были получены следующие результаты:

1. Полученные гранулометрические характеристики разгрузки лабораторной установки имеют высокую степень схожести с данными промышленного роллер-пресса. Средняя абсолютная разница составила 1.86%, относительная погрешность – 5.96%, что подтверждает возможность использования лабораторного оборудования для моделирования работы роллер-пресса.

2. Различия в выходе мелких классов (-0,5 мм) связаны с недостаточным пиковым напряжением сжатия (76,4 МПа) на лабораторном оборудовании по сравнению с промышленным прессом.

Перспективы дальнейшего исследования:

1. Модернизация установки ИКМР с целью достижения необходимого давления в капсуле.

2. Проведение дополнительных испытаний с другими типами руд и проверка вскрытия минералов с использованием микроскопа для повышения достоверности и применимости результатов.

3. Разработка математической модели объемного разрушения для более глубокого анализа механизма процесса.

Таким образом, полученные результаты не только подтвердили возможность моделирования объемного разрушения руды в роллер-прессе с использованием лабораторных аппаратов, но и заложили основу для дальнейших исследований. Разработанный подход позволяет сократить затраты на полупромышленные испытания, ускорить процесс изучения механизма разрушения и оптимизировать методы обработки руд. Дальнейшая реализация предложенных перспектив позволит расширить область применения лабораторного моделирования, повысить точность воспроизведения процессов дробления и значительно улучшить эффективность промышленных технологий обработки руд.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fuerstenau D. W., Abouzeid A.-Z. M., Prasher, C. L. The energy efficiency of ball milling in comminution // *International Journal of Mineral Processing*. 1999. № 55(4). Pp. 261–281.
2. Morrell S., Valery W. The future of comminution: Developments in HPGR technology // *Mining Engineering*. 2009. № 61(12). Pp. 48–53.
3. Wang C., Nadolski S., Mejia O., Drozdak J., Klein B. Energy and cost comparisons of HPGR-based circuits with the SABC circuit installed at the Huckleberry mine // *Minerals Engineering*. 2013. № 56. Pp. 45–55.
4. Wang C., Nadolski S., Mejia O.,

Drozdak J., Klein, B. Energy and cost comparisons of HPGR-based circuits with the SABC circuit installed at the Huckleberry mine // *Proceedings of the 45th Annual Canadian Mineral Processors Operators Conference*. 2013. № 45. Pp. 281–293.

5. Daniel M.J., Morrell S. HPGR model verification and scale-up // *Minerals Engineering*. 2004. № 17(11–12). Pp. 1149–1161.

6. Powell M. S., Morrison R. D., Cleary P. W., Sinnott M. Modelling of particle breakage, wear and energy utilisation in comminution devices // *Minerals Engineering*. 2012. № 29. Pp. 30–39.

7. Шевченко В. И., Лебедев А. Г., Иванов С. С. Современные технологии измельчения в горной промышленности // *Горная промышленность*. 2019. № 3. С. 9–13.

8. Хопунов Э. А. Моделирование процессов дезинтеграции руд // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2016. № 3. С. 104–114.

9. Линч А. Дж. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование и управление. Москва : Недра, 1981. 343 с.

10. Ревнивцев В. И., Гапонов Г. В., Зарогатский Л. П. Селективное разрушение минералов. М. : Недра, 1988. 286 с

11. Ревнивцев В. В., Пономарев С. А., Иванова А. С. Влияние влажности материала на эффективность работы роллер-пресса // *Обогащение руд*. 2020. № 6. С. 15–21.

12. Hilden T., Powell M. S. Particle Shape Effects in High-pressure Grinding Rolls Comminution // *International Journal of Mineral Processing*. 2009.

13. Федотов П. К. Моделирование основных параметров дезинтеграции руды в слое частиц под давлением // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2014. № 4. С. 226–231.

14. Федотов П. К. Методика определения осевой силы давления при разрушении материала в роллер-прессе // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2013. № 2. С. 225–231.

15. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L. The Finite Element Method. 7th Edition – Elsevier, 2013.

16. Федотов П. К. Основная причина снижения энергопотребления при разрушении руды в роллер-прессах // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2013. № 3. С. 309–314.

17. Cleary P.W., Sinnott M.D., Morrison R.D. DEM Modelling of Industrial High-Pressure Grinding Rolls // *Minerals Engineering*. 2008.

18. Федотов П. К. Эффективность разрушения руды с использованием традиционной технологии рудоподготовки в сравнении с применением объемного

разрушения руды // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 4. С. 309–318.

19. Краснов Г. Д., Никитин С. М., Подгаецкий А. В., Чихладзе В. В. Изменение свойств минеральных ассоциаций в условиях объемного сжатия // Горный информационно-

аналитический бюллетень. 2008. № 7. С. 381–390.

20. Краснов Г. Д., Подгаецкий А. В., Чихладзе В. В. Опыт моделирования процесса дробления в роллер-прессе // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № S14. С. 89–102.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Махно Николай Артемович, Иркутский национальный исследовательский технический университет, (664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), аспирант, e-mail: Makhno_N_A@mail.ru
Федотов Павел Константинович, Иркутский национальный исследовательский технический университет, (664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), доктор технических наук, профессор, e-mail: fedotovpavel@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Федотов П.К. – постановка исследовательской задачи; концептуализация исследования; выводы.

Махно Н.А. – обзор соответствующей литературы; написание текста, сбор и анализ данных; выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

ANALYSIS AND EXPERIENCE OF MODELING THE PROCESS OF ORE DESTRUCTION IN LABORATORY CONDITIONS

Nikolai A. Makhno *, Pavel K. Fedotov

Irkutsk National Research Technical University

* for correspondence: Makhno_N_A@mail.ru



Article info

Received:

26 December 2024

Accepted for publication:

10 June 2025

Accepted:

20 June 2025

Published:

26 June 2025

Keywords: modeling, roller press, ore destruction, disintegration, interparticle fracture test capsule, finite element method (FEM), selective crushing.

Abstract.

The relevance of the work is due to the increasing global demand for mineral resources and the need to develop more efficient methods for processing ore materials. Reducing energy consumption at the stages of enrichment and improving crushing quality is achieved through the use of modern technologies such as roller presses for more efficient crushing of ores. These technologies help to increase productivity and reduce environmental impacts, which makes them extremely important for the sustainable development of the mining industry.

This work is devoted to the analysis of existing methods for modeling the process of ore destruction in a roller press. The article discusses mathematical modeling using the finite element method (FEM) and physical modeling in test capsules to reproduce the conditions of the real grinding process.

The main actions include the analysis of existing approaches, the development of a volumetric fracture modeling scheme, as well as conducting experiments with copper ore, including sieve analysis and determining the convergence of the granulometric composition obtained during the laboratory experiment with the granulometric composition of the roller press discharge. These studies are aimed at improving the understanding of the mechanism of interparticle fracture and optimizing the parameters of the roller press, which will increase the efficiency of crushing processes and

reduce energy consumption for subsequent stages of enrichment.

For citation: Makhno N.A., Fedotov P.K. Analysis and experience of modeling the process of ore destruction in laboratory conditions. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 3(169):169-181. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-169-181, EDN: NDRERN

REFERENCES

1. Fuerstenau D.W., Abouzeid A.-Z.M., Prasher, C.L. (1999). The energy efficiency of ball milling in comminution. *International Journal of Mineral Processing*. 1999; 55(4):261–281.
2. Morrell S., Valery W. The future of comminution: Developments in HPGR technology. *Mining Engineering*. 2009; 61(12):48–53.
3. Wang C., Nadolski S., Mejia O., Drozdak J., Klein B. Energy and cost comparisons of HPGR-based circuits with the SABC circuit installed at the Huckleberry mine. *Minerals Engineering*. 2013; 56:45–55.
4. Wang C., Nadolski S., Mejia O., Drozdak J., Klein B. (2013). Energy and cost comparisons of HPGR-based circuits with the SABC circuit installed at the Huckleberry mine. *Proceedings of the 45th Annual Canadian Mineral Processors Operators Conference*. 2013; 45:281–293.
5. Daniel M.J., Morrell S. HPGR model verification and scale-up. *Minerals Engineering*. 2014; 17(11–12):1149–1161.
6. Powell M.S., Morrison R.D., Cleary P.W., Sinnott M. Modelling of particle breakage, wear and energy utilisation in comminution devices. *Minerals Engineering*. 2012; 29:30–39.
7. Shevchenko V.I., Lebedev A.G., Ivanov S.S. Sovremennye tekhnologii izmel'cheniya v gornoj promyshlennosti. *Gornaya promyshlennost'*. 2019; 3:9–13.
8. Hopunov E.A. Modelirovanie processov dezintegratsii rud. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Gornyy zhurnal*. 2016; 3:104–114.
9. Linch A.Dzh. Cikly drobleniya i izmel'cheniya. Modelirovanie, optimizatsiya, proektirovanie i upravlenie. Moskva: Nedra; 1981.
10. Revnivcev V.I., Gaponov G.V., Zarogatskiy L.P. Selektivnoe razrushenie mineralov. M.: Nedra; 1988.
11. Revnivcev V.V., Ponomarev S.A., Ivanova A.S. Vliyaniye vlazhnosti materiala na effektivnost' raboty roller-pressa. *Obogashchenie rud*. 2020; 6; 15–21.
12. Hilden T., Powell M.S. "Particle Shape Effects in High-pressure Grinding Rolls Comminution". *International Journal of Mineral Processing*. 2009.
13. Fedotov P.K. Modelirovanie osnovnykh parametrov dezintegratsii rudy v sloe chastic pod davleniem. *Gornyy informatsionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. 2014; 4:226–231.
14. Fedotov P.K. Metodika opredeleniya osevoj sily davleniya pri razrushenii materiala v roller-presse. *Gornyy informatsionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. 2013; 2:225–231.
15. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The Finite Element Method. 7th Edition – Elsevier, 2013.
16. Fedotov P.K. Osnovnaya prichina snizheniya energopotrebleniya pri razrushenii rudy v roller-presse. *Gornyy informatsionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. 2013; 3:309–314.
17. Cleary, P.W., Sinnott, M.D., Morrison, R.D. "DEM Modelling of Industrial High-Pressure Grinding Rolls". *Minerals Engineering*. 2008.
18. Fedotov P.K. Effektivnost' razrusheniya rudy s ispol'zovaniem tradicionnoy tekhnologii rudopodgotovki v sravnenii s primeneniem ob'emnogo razrusheniya rudy. *Gornyy informatsionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. 2013; 4:309–318.
19. Krasnov G.D., Nikitin S.M., Podgaekij A.V., Chihladze V.V. Izmenenie svoystv mineral'nykh assotsiatsiy v usloviyakh ob'emnogo szhatiya. *Gornyy informatsionno-analiticheskij byulleten'*. 2008; 7:381–390.
20. Krasnov G.D., Podgaekij A.V., Chihladze V.V. Opyt modelirovaniya processa drobleniya v roller-presse. *Gornyy informatsionno-analiticheskij byulleten'*. 2009; S14:89–102.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Makhno Nikolay Artemovich, Irkutsk National Research Technical University, (664074, Russian Federation, Irkutsk, Lermontov St., 83), graduate student, e-mail: Makhno_N_A@mail.ru

Fedotov Pavel Konstantinovich, Irkutsk National Research Technical University, (664074, Russian Federation, Irkutsk, Lermontov St., 83), Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: fedotovpavel@yandex.ru

Contribution of the authors:

Fedotov P.K. – formulation of the research problem; conceptualization of the study; conclusions.

Makhno N.A. – review of existing literature; text writing, data collection and analysis; conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.

