

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕМНОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕДНОЙ РУДЫ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ФЛОТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Н.А. Махно

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Иркутск, Россия, e-mail: Makhno\_N\_A@mail.ru

**Аннотация:** Рассмотрено влияние условий межчастичного сжатия на флотационную обогатимость медной руды. Проведено сопоставление результатов моделирования объемного разрушения в лабораторной испытательной капсуле межчастичного сжатия и промышленного измельчения в роллер-прессе высокого давления. В качестве объекта исследования использована медная руда, для которой выполнены серии испытаний при различных уровнях давления и числе циклов сжатия с последующей флотационной оценкой продуктов. Показано достижимое извлечение меди при варьировании параметров нагружения в лабораторной установке и проведено сравнение с результатами флотации промышленного продукта роллер-пресса. Установлено, что моделирование в лабораторных условиях при сопоставимом уровне контактных напряжений обеспечивает формирование структуры разрушения, характеризующейся развитием системы микро-трещин, аналогичной промышленному процессу. Это приводит к сопоставимой степени раскрытия сульфидных минералов и близким значениям извлечения меди. Абсолютное расхождение показателей извлечения не превышает 1,5%, что свидетельствует о высокой достоверности воспроизведения механизмов объемного разрушения. При накоплении достаточного объема статистических данных разработанная методика может быть использована для предварительной оценки эффективности применения роллер-прессов при переработке медных руд, а также для обоснования и оптимизации технологических параметров процессов межчастичного сжатия на стадии проектирования и модернизации обогатительных фабрик.

**Ключевые слова:** медная руда, межчастичное сжатие, роллер-пресс, объемное разрушение, флотация, раскрытие минералов, извлечение меди, гранулометрический состав, лабораторное моделирование.

**Для цитирования:** Махно Н. А. Моделирование объемного разрушения медной руды и его влияние на флотационные показатели в лабораторных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 8. – С. 116–126. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2026\_8\_0\_116.

### Simulation of volumetric fracture of copper ore and implications for laboratory flotation

N.A. Makhno

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia, e-mail: Makhno\_N\_A@mail.ru

---

**Abstract:** The influence of intergranular compression on floatability of copper ore is analyzed. The results of volumetric fracture in a laboratory intergranular compression testing shell are compared with the outcome of industrial-scale high-pressure grinding rolls. The subject of research was copper ore which was tested under different pressures and at different number of the compression cycles, with the subsequent evaluation of flotation performance. The achievable recovery of copper in variation of loading parameters on the laboratory plant is shown and compared with the results of flotation of middlings after the industrial grinding rolls. It is found that lab-scale simulation at a certain level of the contact stress ensures formation of a fracture structure characterized by the developed system of microcracks similar to the production-scale fracturing. This leads to the comparable scale of dissociation of sulfide minerals and to the analogous values of copper recovery. The absolute divergence of the recovery indexes is not higher than 1.5%, which is reflective of the high reliability of the volumetric fracture mechanism simulation. With the sufficient collected statistics, the developed procedure can be used for the preliminary evaluation of grinding roll efficiency in copper ore treatment, as well as for the justification and optimization of intergranular compression process variables at the stage of planning, design and upgrading of processing plants.

**Key words:** copper ore, intergranular compression, grinding rolls, volumetric fracture, flotation, dissociation of minerals, copper recovery, grain-size composition, laboratory simulation.

**For citation:** Makhno N. A. Simulation of volumetric fracture of copper ore and implications for laboratory flotation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(8):116-126. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2026\_8\_0\_116.

---

## Введение

Рост мирового спроса на цветные и редкие металлы сопровождается необходимостью повышения энергоэффективности процессов переработки минерального сырья. Традиционные схемы дробления и измельчения, основанные на последовательных ударах и истирании, характеризуются значительными потерями энергии на разрушение вмещающих пород и нагрев материала [1, 2]. По данным последних исследований, на стадии измельчения расходуется до 40–60% всей электроэнергии, потребляемой обогатительной фабрикой [3, 4]. Поэтому внедрение технологий, обеспечивающих снижение энергопотребления при сохранении требуемой степени раскрытия минералов, является одним из приоритетных направлений развития современного обогащения.

Использование роллер-пресса (HPGR) для межчастичного разрушения стало

признанной альтернативой традиционным схемам измельчения. Промышленные и исследовательские данные показывают, что применение роллер-пресса позволяет не только снизить удельное энергопотребление на стадии подготовки руды, но и изменить сам характер разрушения частиц. В отличие от ударных и истирающих аппаратов, где процесс носит преимущественно поверхностный характер, при межчастичном сжатии реализуется объемное разрушение слоя материала [1, 2, 5]. Отличительной особенностью такого воздействия является равномерное распределение нагрузки по всему объему, что способствует формированию микротрещин в пределах зерен и вдоль межзерновых границ и тем самым минимизируется избыточное измельчение и повышается селективность раскрытия минералов [6–8].

Возникающая микротрещиноватость оказывает комплексное влияние на по-

следующие технологические стадии. Для продуктов, полученных после роллер-пресса, характерно уменьшение прочности частиц и повышение их измельчаемости, что приводит к снижению энергозатрат на доизмельчение и повышению извлечения полезных компонентов при флотации или гидрометаллургической переработке [9, 10].

Таким образом, эффект межчастичного сжатия выходит за рамки только стадии дробления, оказывая влияние на всю цепочку обогащения процесса. Это делает технологию роллер-прессов одним из ключевых инструментов интенсификации современной схемы подготовки руд к обогащению.

В связи с этим актуальной задачей остается разработка лабораторных методик, позволяющих достоверно воспроизводить характер объемного разрушения материала при межчастичном сжатии [11 – 13]. Такие методики необходимы как для предварительной оценки эффективности применения роллер-прессов при переработке конкретных типов руд, так и для определения оптимальных параметров давления и степени сжатия на стадии проектирования технологических схем. Применение таких методик особенно актуально при исследовании новых месторождений, где ограниченный объем исходного материала не позволяет проводить полномасштабные промышленные испытания. Лабораторное моделирование в испытательной капсуле межчастичного разрушения (ИКМР) дает возможность оперативно оценить влияние давления, влажности, текстуры и минералогического состава руды на эффективность разрушения, что существенно сокращает сроки и затраты на подготовку проектных решений. Следовательно, эти методики должны давать продукт, сопоставимый по гранулометрическим характеристикам, энергетическим параметрам и степени

минералогического раскрытия с промышленным продуктом роллер-пресса [14, 15].

Показано, что лабораторные методики, основанные на имитации межчастичного сжатия, обеспечивают получение продуктов, сопоставимых с промышленными по гранулометрическому составу и энергии разрушения [16, 17]. Однако вопрос о фактической степени раскрытия сульфидных минералов, характере формирования микротрещиноватости и их влиянии на флотационные показатели при варьировании давления и числа циклов сжатия остается недостаточно изученным.

Настоящая работа направлена на проверку адекватности лабораторного моделирования объемного разрушения медной руды путем сопоставления флотационной обогатимости продуктов ИКМР и роллер-пресса [17, 18]. Проведены серии лабораторных опытов при различных уровнях давления и числе циклов сжатия и флотационные тесты в идентичных реагентных режимах [19, 20]. Результаты позволяют оценить степень соответствия лабораторных и промышленных продуктов по извлечению меди и подтвердить применимость ИКМР как экспресс-метода для оценки эффективности межчастичного разрушения.

### **Методы**

Объектом исследования является медная руда, использованная для лабораторного моделирования межчастичного сжатия и проведения флотационных испытаний.

По химическому составу руда относится к кремнистым с высоким содержанием алюмосиликатных компонентов. Основную массу составляют оксиды кремния и алюминия, что указывает на преобладание кварц-слюдисто-хлоритовых пород в качестве вмещающей матрицы. Содержание меди в исходной пробе со-

ставляет 0,30%, серы — 1,0%, железа (в пересчете на Fe<sub>общ.</sub>) — 6,5%, при этом доля сульфидной формы железа не превышает 1%.

Минеральный состав руды характеризуется преобладанием порообразующих силикатов и карбонатов, при сравнительно небольшом содержании рудных минералов. Руда относится к слабосульфидным по степени насыщенности медными и железосодержащими минералами [18].

Перед проведением флотационных экспериментов материал тщательно усреднялся и разделялся на лабораторные навески по 300 г для обеспечения однородности проб. Средняя влажность руды составляла 3,5%, температура 20–22 °С.

Для сравнения флотационной обогатимости были подготовлены четыре навески с идентичным гранулометрическим составом (табл. 1), различающиеся только условиями предварительного сжатия.

Первые три пробы были получены по вновь разработанной методике лабораторного моделирования объемного разрушения, подробно описанной автором ранее [18, 19]. На начальном этапе экспериментов предельное давление составляло 75 МПа — максимальное значение, достижимое на имеющемся гидравлическом прессе. При этом анализ показал, что продукты сжатия имели удовлетворительную гранулометрию, но отличались от материала роллер-пресса

по индексу Бонда и степени разупрочнения. Для повышения сопоставимости параметров была проведена серия испытаний с двойным сжатием при 75 МПа, что позволило приблизить распределение классов крупности, но не обеспечило аналогичной степени раскрытия.

В дальнейшем была изготовлена новая капсула диаметром 60 мм (вместо 100 мм), что позволило при той же силе пресса достичь давления до 220 МПа. Это обеспечило возможность проведения опытов при промышленно сопоставимом уровне 188 МПа ( $\approx 3,5$  Н/мм<sup>2</sup>), характерном для эксплуатации роллер-прессов при переработке медных руд.

Четвертая проба представляла собой промышленный продукт, полученный после обработки руды в роллер-прессе (HPGR) при аналогичном уровне контактных напряжений.

Испытания проводились при следующих режимах:

- 1) однократное сжатие в ИКМР диаметром 100 мм, при 75 МПа;
- 2) двукратное сжатие в ИКМР диаметром 100 мм, при 75 МПа;
- 3) однократное сжатие в ИКМР диаметром 60 мм, при 188 МПа;
- 4) продукт роллер-пресса при 188 МПа.

Контроль давления осуществлялся встроенными датчиками гидравлического пресса, обеспечивающими регистрацию усилия сжатия в реальном времени. Продолжительность приложения давле-

Таблица 1

**Гранулометрическая характеристика флотационных проб**  
**Particle size distribution of flotation samples**

Размер частиц, мм	Масса, г	Выход, %	Суммарный выход, %
–0,1+0,071	30	10	100
–0,071+0,04	70	23,3	90,0
–0,04	200	66,7	66,7
Итого	300	100	–

ния составляла 10–15 с с выдержкой в 2 с при пиковом значении, что позволило исключить динамические эффекты и обеспечить равномерное распределение нагрузки в слое частиц.

Реагентный режим (табл. 2) принят по типовой схеме флотации медных сульфидных руд. Поддержание  $\text{pH} \approx 11,5$  обеспечивалось известковым молоком, что стабилизировало поверхность халькопирита и снижало активность пирита [21]. В качестве собирателя применяли бутиловый ксантогенат калия — он обеспечивает устойчивое извлечение меди при щелочной реакции среды; роль депрессора шламовых силикатов выполняло жидкое стекло, а вспенивателем

был выбран МIBC (метилизобутилкарбинол) [22].

Флотационные испытания проводились в лабораторной механической флотационной машине. Продолжительность агитации составляла 5 мин, время проведения основной флотации — 2 мин, повторной агитации — 5 мин и контрольной флотации — 12 мин. На стадиях агитации добавлялись  $\text{CaO}$ , веретенное масло и  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ; при флотации вводились РВХ (бутиловый ксантогенат калия) и МIBC; при контрольной флотации — РВХ, карбамид и МIBC, более подробно последовательность операций и их продолжительность указаны на рисунке и в табл. 2.

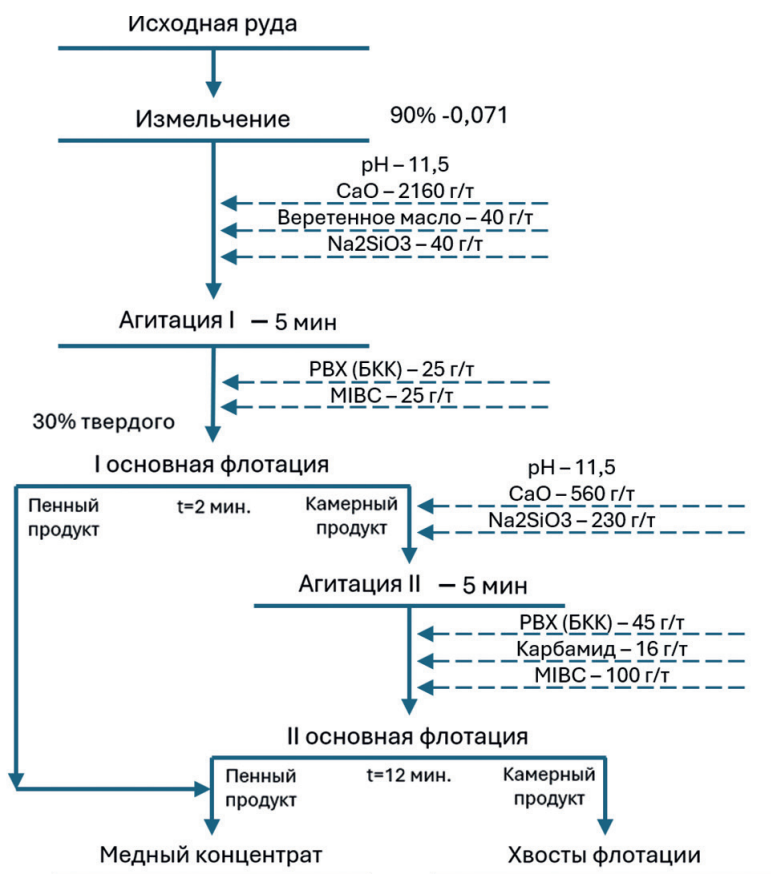


Схема обогащения

Flowsheet of the beneficiation process

Таблица 2

**Карта реагентного режима**  
**Reagent mode map**

Точка подачи	Расход реагента, г/т						Концентрации рабочих растворов, %					
	CaO	Веретенное масло	РВХ (БКК)	Карбамид	МIBC	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	CaO	Веретенное масло	РВХ (БКК)	Карбамид	МIBC	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>
Агитация I	pH 11,5	40	-	-	-	230	10	100	5	5	100	30-35
I основная флотация	pH 11,5	-	25	-	25	-						
Агитация II	pH 11,5	-	-	-	-	230						
II основная флотация	pH 11,5	-	45	16	100	-						

Такой порядок введения реагентов позволял моделировать промышленную схему с этапным насыщением пульпы активными веществами и стабилизацией минералов перед каждой стадией флотации.

Концентрат и хвосты после флотации сушили, взвешивали и анализировали на содержание меди. Извлечение меди рассчитывали по материальному балансу. Повторяемость опытов оценивалась по четырем параллельным определениям, отклонение не превышало  $\pm 1,8\%$ .

Сочетание реагентов и последовательность их подачи (см. рисунок) обеспечивали воспроизводимость условий флотации и позволили выделить влияние степени межчастичного разрушения на технологические показатели.

### Результаты и обсуждение

После завершения серии испытаний для всех вариантов межчастичного сжатия были получены флотационные продукты, различающиеся по степени разупрочнения, раскрытию и морфологии поверхности частиц, результаты флотационных испытаний представлены в табл. 3, шифр проб сформирован следующим образом: первая цифра — номер

опыта, вторая цифра: 1 — концентрат, 2 — хвосты (например, ИКМР-3-2 — хвосты опыта номер 3).

Анализ полученных данных показал, что изменение давления и числа циклов межчастичного сжатия оказывает существенное влияние на показатели флотации и морфологические особенности продукта. При низких давлениях деформация частиц ограничивается поверхностными зонами, а возникающие трещины не проникают в объем зерен. Повторное сжатие при том же уровне давления вызывает развитие вторичных трещин и частичное отделение вкрапленных сульфидов, однако структурная целостность минеральной матрицы остается высокой, что подтверждается ранее проведенными исследованиями (определение индекса «чистой» работы Ф. Бонда, исследование шлифов отраженного света) [19, 20]. Таким образом, уже на этом этапе видно, что характер разрушения при различных давлениях определяет степень раскрытия рудных минералов и напрямую влияет на их последующую обогатимость.

При увеличении давления до 188 МПа формируется тип разрушения, сопровождающийся переходом от локальных микротрещин к сети сквозных межзер-

Таблица 3

**Результаты флотационных опытов**  
**Results of flotation experiments**

Номер опыта	Шифр проб	Масса, г	Выход, %	Содержание Cu, г/т	Извлечение, %
1	ИКМР-1-1	70,58	23,53	9,70	76,04
	ИКМР-1-2	229,42	76,47	0,94	23,96
	Итого	300,00	100,00	3,00	100,00
2	ИКМР-2-1	92,00	30,67	8,98	82,55
	ИКМР-2-2	208,00	69,33	0,84	17,45
	Итого	300,00	100,00	3,34	100,00
3	ИКМР-3-1	85,54	28,51	10,38	88,84
	ИКМР-3-2	214,46	71,49	0,52	11,16
	Итого	300,00	100,00	3,33	100,00
4	ИКМР-4-1	47,66	15,89	13,90	87,36
	ИКМР-4-2	252,34	84,11	0,38	12,64
	Итого	300,00	100,00	2,53	100,00

новых дефектов. Это создает условия для более полного раскрытия халькопирита и повышает вероятность его взаимодействия с реагентами при флотации.

Снижение давления межчастичного сжатия в первом опыте закономерно привело к уменьшению извлечения меди до 76,04%, что значительно ниже по сравнению с пробой № 4, полученной на промышленном роллер-прессе. Это согласуется с ранее опубликованными результатами лабораторного моделирования, где фиксировалось недостаточное развитие микротрещиноватости при сниженном давлении в ИКМР [19].

Во втором испытании, где материал подвергался двукратному сжатию при 75 МПа, извлечение меди повысилось до 82,55%. Повторное сжатие привело к дополнительному измельчению и более равномерному распределению мелких классов, однако степень раскрытия сульфидных зерен осталась ограниченной. Несмотря на сходство гранулометрических характеристик [18], флотационная активность минералов оставалась ниже промышленного уровня, что свя-

зано с сохранением части медных минералов в ассоциации с кварцем и хлоритом (подтверждено микроскопическим анализом шлифов) [19].

Наилучшие показатели были получены для пробы № 3, подготовленной в ИКМР при однократном сжатии 188 МПа: извлечение меди составило 88,84%, что незначительно превышает 87,36% для промышленного продукта роллер-пресса. При этом абсолютная и относительная погрешность составляет 1,48 и 1,67% соответственно. При таком уровне давления в капсуле реализуется механизм межчастичного сжатия, близкий по энергетике и характеру напряжений к промышленным условиям, что обеспечивает формирование развитой сети микротрещин и более полное раскрытие минералов меди. Это отражается в повышении флотационной активности за счет более полного раскрытия и роста числа гидрофобных поверхностей, доступных для взаимодействия с собирателем.

Следует отметить, что превышение извлечения меди в лабораторной пробе

на 1,48% по сравнению с промышленным образцом находится в пределах аналитической погрешности химического анализа и воспроизводимости флотационных испытаний. Таким образом, можно утверждать, что лабораторная установка ИКМР обеспечивает адекватное воспроизведение механизма межчастичного разрушения и позволяет получать продукт, сопоставимый с промышленным по степени раскрытия и обогатимости.

Полученные результаты подтверждают, что характер межчастичного разрушения оказывает решающее влияние на флотационные показатели медной руды. Повышение давления способствует переходу от поверхностного к объемному типу разрушения, что критически влияет на раскрытие и, как следствие, на показатели извлечения меди. Лабораторные испытания показали, что при соразмерном давлении в ИКМР достигается степень раскрытия [18 – 20], сопоставимая с промышленным продуктом роллер-пресса, при этом расхождение по извлечению меди не превышает 2%.

Дальнейшие исследования планируются направить на расширение области применения разработанной методики лабораторного моделирования объемного разрушения. Особое внимание будет уделено валидации методики на различных типах руд, что позволит определить границы корректного воспроизведения процессов межчастичного сжатия.

Также предполагается разработка математической модели, описывающей распределение контактных напряжений и кинетику накопления микротрещин в объеме капсулы ИКМР. Создание такой модели позволит не только глубже понять механизм дезинтеграции материала, но и количественно оценивать вклад различных факторов (структуры руды, давления, числа циклов) в эффективность разрушения.

Такая модель станет основой для установления взаимосвязи между процессами разрушения в роллер-прессе и лабораторной установке, обеспечивая теоретическое обоснование применимости методики для прогнозирования технологических результатов.

## **Выводы**

1. Проведено сопоставление флотационной обогатимости продуктов лабораторного моделирования объемного разрушения руды и промышленного роллер-пресса. Получено подтверждение того, что разработанная лабораторная методика обеспечивает воспроизводимость технологических показателей промышленного процесса HPGR при корректном выборе параметров сжатия.

2. Установлено, что величина давления сжатия оказывает ключевое влияние на степень раскрытия минералов и, как следствие, на извлечение меди. При недостаточном давлении (75 МПа) разрушение ограничивается формированием поверхностных зон деформации, без развития микротрещин в объеме частиц, что приводит к неполному раскрытию вкрапленных зерен халькопирита и снижению извлечения до 76,0%. Повторное сжатие при том же уровне давления повышает показатель до 82,6%, однако результаты остаются ниже промышленного уровня вследствие локального характера разрушения и неполного раскрытия сульфидов.

3. Наилучшие результаты достигнуты при однократном сжатии в ИКМР при 188 МПа — извлечение 88,8%, что практически соответствует данным флотации промышленного продукта в роллер-прессе (87,4%). Абсолютная и относительная погрешность составляет 1,48 и 1,67% соответственно, что подтверждает корректность выбранных параметров и реализацию в лабораторных условиях механизма межчастичного раз-

рушения, аналогичного промышленно-му HPGR.

4. Разработанная методика сможет использоваться для оперативной оценки влияния параметров роллер-пресса на флотационную обогатимость руд, а также для прогнозирования технологических показателей и технико-экономического обоснования внедрения HPGR на стадиях проектирования, реконструкции и оптимизации обогатительных

фабрик, после установления математической зависимости и набора статистических данных.

Автор выражает признательность Федотову Павлу Константиновичу за консультацию по вопросам лабораторного моделирования объемного разрушения руды в установке ИКМР, а также Сахабутдиновой Татьяне Хамитовне за содействие при проведении флотационных испытаний.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурхардт Э., Кесслер М. Применение валковых дробилок высокого давления в горно-перерабатывающей промышленности // Горный журнал. — 2014. — № 11. — С. 26–30.

2. Saramak D., Leśniak K. Impact of HPGR operational pressing force and material breakage on energy savings and comminution performance // Minerals Engineering. 2024, vol. 301, article 131908. DOI: 10.1016/j.mineng.2024.108615.

3. Ефимов Д. А., Господариков А. П. Перспективы использования валков с профилем Рело в дробилке и измельчающих валках высокого давления // Горное оборудование и электромеханика. — 2022. — № 4 (162). — С. 36–43. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-4-36-43.

4. Wei B., Yuan Z., Feng Q., Zhang Q., Xu X., Meng Q., Klein B., Li L. Optimization of high-pressure grinding roll (HPGR) performance in an industrial-scale HPGR/Tower mill comminution circuit // Minerals. 2025, vol. 15, no. 10, article 1065. DOI: 10.3390/min15101065. <https://www.mdpi.com/2075-163X/15/10/1065>

5. Ballantyne G. R., Hilden M., van der Meer F. P. Improved characterisation of ball milling energy requirements for HPGR products // Minerals Engineering. 2017, vol. 109, pp. 114–120. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.03.016.

6. Kodali P., Dhawan N., Depci T., Lin C. L., Miller J. D. Particle damage and exposure analysis in HPGR crushing of selected copper ores for column leaching // Minerals Engineering. 2011, vol. 24, no. 13, pp. 1478–1487. DOI: 10.1016/j.mineng.2011.06.001.

7. Bearman R. High-pressure grinding rolls — Characterising and defining process performance for engineers / Advances in Comminution. Ed. S. K. Kawatra. 2006, pp. 3–14.

8. Weerasekara N. S., Powell M. S., Cleary P. W., Tavares L. M., Evertsson M., Morrison R. D., Quist J., Carvalho R. M. The contribution of DEM to the science of comminution // Powder Technology. 2013, vol. 248, pp. 3–24. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.05.032.

9. Gu R., Qin Z., Zhao S., Xing H., Chen L., Yang F. Mechanical characteristics of roll crushing of ore materials based on discrete element method // Scientific Reports. 2025, vol. 15, article 771. DOI: 10.1038/s41598-024-84734-0. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-84734-0>.

10. Morrell S. Predicting the specific energy of autogenous and semi-autogenous mills from small-diameter drill-core samples // Minerals Engineering. 2004, vol. 17, no. 4–5, pp. 447–451. DOI: 10.1016/j.mineng.2003.10.015.

11. Guo J., Wang S., Liu Z., Wang G., Wu S., Guan W., Zhang H. Simulation and analysis of high-pressure grinding rolls (HPGR) comminution process // Minerals Engineering. 2024, vol. 218, article 109039. DOI: 10.1016/j.mineng.2024.109039.

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

13. Li N., Li L., Wang J., Liu Z., Feng Q., Zhang Q., Liu H., Klein B., Li B. Prediction of circulation load of side-flanged high-pressure grinding rolls closed-circuit crushing // Minerals. 2025, vol. 15, no. 6, article 603. DOI: 10.3390/min15060603.

14. Линч А. Дж. Циклы дробления и измельчения: моделирование, оптимизация, проектирование и управление. — М.: Недра, 1981. — 343 с.

15. Hawkins R. A. A piston and die test to predict laboratory-scale HPGR performance. — The University of Queensland, 2008. DOI: 10.14264/158721.
16. Pamparana G., Klein B., Bergerman M. Methodology and model to predict HPGR throughput based on piston press testing // *Minerals*. 2022, vol. 12, p. 1377.
17. Kumar A., Wang C., Gong D., Saud C., Pamparana G., Klein B. Development of Locked-cycle piston press test procedure to simulate closed circuit HPGR comminution // *Minerals Engineering*. 2023, vol. 201, article 108160.
18. Махно Н. А., Федотов П. К. Анализ и опыт моделирования процесса разрушения руды в лабораторных условиях // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. — 2025. — № 3. — С. 169–181. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-169-181.
19. Махно Н. А., Федотов П. К. Сравнение эффективности лабораторного моделирования и промышленного разрушения руды в роллер-прессе с использованием методики Бонда / Актуальные проблемы эффективного использования полезных ископаемых и сохранения окружающей среды: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции «Леоновские чтения–2025». — 2025. — С. 70–73.
20. Махно Н. А., Федотов П. К. Оценка достоверности методики лабораторного моделирования межчастичного разрушения в роллер-прессе / Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья: Материалы Международной конференции «Плаксинские чтения–2025». — Екатеринбург, 2025. — С. 176–179. DOI: 10.21440/978-5-6047797-5-0-2025-3-510.
21. Асончик К. М., Аксенова Г. Я., Максимов И. И., Тасина Т. И. Исследование различных режимов флотации медно-порфировой руды // *Обогащение руд*. — 2017. — № 4. DOI: 10.17580/or.2017.04.04.
22. Лавриненко А. А., Лусинян О. Г., Кузнецова И. Н., Оленников В. Г. Получение медного концентрата при обогащении железных руд // *Известия вузов. Цветная металлургия*. — 2023. — Т. 29. — № 1. — С. 5–15. DOI: 10.17073/0021-3438-2023-1-5-15. **PLAB**

## REFERENCES

- Burkhardt E., Kessler M. Application of high-pressure roller crushers in the mining and processing industry. *Gornyi Zhurnal*. 2014, no. 11, pp. 26–30. [In Russ].
- Saramak D., Leśniak K. Impact of HPGR operational pressing force and material breakage on energy savings and comminution performance. *Minerals Engineering*. 2024, vol. 301, article 131908. DOI: 10.1016/j.mineng.2024.108615.
- Efimov D. A., Gospodarikov A. P. Prospects for using Relo-profile rolls in crushers and high-pressure grinding rolls. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2022, no. 4 (162), pp. 36–43. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-4-36-43.
- Wei B., Yuan Z., Feng Q., Zhang Q., Xu X., Meng Q., Klein B., Li L. Optimization of high-pressure grinding roll (HPGR) performance in an industrial-scale HPGR/Tower mill comminution circuit. *Minerals*. 2025, vol. 15, no. 10, article 1065. DOI: 10.3390/min15101065. <https://www.mdpi.com/2075-163X/15/10/1065>
- Ballantyne G. R., Hilden M., van der Meer F. P. Improved characterisation of ball milling energy requirements for HPGR products. *Minerals Engineering*. 2017, vol. 109, pp. 114–120. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.03.016.
- Kodali P., Dhawan N., Depci T., Lin C. L., Miller J. D. Particle damage and exposure analysis in HPGR crushing of selected copper ores for column leaching. *Minerals Engineering*. 2011, vol. 24, no. 13, pp. 1478–1487. DOI: 10.1016/j.mineng.2011.06.001.
- Bearman R. High-pressure grinding rolls – Characterising and defining process performance for engineers. *Advances in Comminution*. Ed. S. K. Kawatra. 2006, pp. 3–14.
- Weerasekara N. S., Powell M. S., Cleary P. W., Tavares L. M., Evertsson M., Morrison R. D., Quist J., Carvalho R. M. The contribution of DEM to the science of comminution. *Powder Technology*. 2013, vol. 248, pp. 3–24. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.05.032.
- Gu R., Qin Z., Zhao S., Xing H., Chen L., Yang F. Mechanical characteristics of roll crushing of ore materials based on discrete element method. *Scientific Reports*. 2025, vol. 15, article 771. DOI: 10.1038/s41598-024-84734-0. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-84734-0>.

10. Morrell S. Predicting the specific energy of autogenous and semi-autogenous mills from small-diameter drill-core samples. *Minerals Engineering*. 2004, vol. 17, no. 4–5, pp. 447–451. DOI: 10.1016/j.mineng.2003.10.015.

11. Guo J., Wang S., Liu Z., Wang G., Wu S., Guan W., Zhang H. Simulation and analysis of high-pressure grinding rolls (HPGR) comminution process. *Minerals Engineering*. 2024, vol. 218, article 109039. DOI: 10.1016/j.mineng.2024.109039.

12. Khopunov E. A. Modeling of ore disintegration processes. *Minerals and Mining Engineering*. 2016, no. 3, pp. 104–114. [In Russ].

13. Li N., Li L., Wang J., Liu Z., Feng Q., Zhang Q., Liu H., Klein B., Li B. Prediction of circulation load of side-flanged high-pressure grinding rolls closed-circuit crushing. *Minerals*. 2025, vol. 15, no. 6, article 603. DOI: 10.3390/min15060603.

14. Lynch A. J. *Tsikly drobleniya i izmel'cheniya: modelirovanie, optimizatsiya, proektirovanie i upravlenie* [Crushing and grinding circuits: modeling, optimization, design, and control], Moscow, Nedra, 1981, 343 p.

15. Hawkins R. A. *A piston and die test to predict laboratory-scale HPGR performance*. The University of Queensland, 2008. DOI: 10.14264/158721.

16. Pamparana G., Klein B., Bergerman M. Methodology and model to predict HPGR throughput based on piston press testing. *Minerals*. 2022, vol. 12, p. 1377.

17. Kumar A., Wang C., Gong D., Saud C., Pamparana G., Klein B. Development of Locked-cycle piston press test procedure to simulate closed circuit HPGR comminution. *Minerals Engineering*. 2023, vol. 201, article 108160.

18. Makhno N. A., Fedotov P. K. Analysis and experience of ore destruction process modeling in laboratory conditions. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2025, no. 3, pp. 169–181. [In Russ]. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-3-169-181.

19. Makhno N. A., Fedotov P. K. Comparison of efficiency between laboratory modeling and industrial ore destruction in roller press using Bond method. *Aktual'nye problemy effektivnogo ispol'zovaniya poleznykh iskopaemykh i sokhraneniya okruzhayushchey sredy: Materialy III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Leonovskie chteniya–2025»* [Actual problems of efficient use of mineral resources and environmental protection: Proceedings III All-Russian Scientific and Practical Conference «Leonov Readings–2025»], 2025, pp. 70–73. [In Russ].

20. Makhno N. A., Fedotov P. K. Reliability assessment of laboratory modeling method of interparticle destruction in a roller press. *Innovatsionnye protsessy kompleksnoy i glubokoy pererabotki prirodnoy i netraditsionnoy mineral'nogo syr'ya: Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii «Plaksinские chteniya–2025»* [Innovative processes of complex and deep processing of natural and unconventional mineral raw materials: Proceedings International Conference «Plaksin Readings–2025»], Ekaterinburg, 2025, pp. 176–179. [In Russ]. DOI: 10.21440/978-5-6047797-5-0-2025-3-510.

21. Asonchik K. M., Aksenova G. Ya., Maksimov I. I., Tasina T. I. Study of various flotation modes of copper-porphyry ore. *Obogashchenie Rud*. 2017, no. 4. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2017.04.04.

22. Lavrinenko A. A., Lusinyan O. G., Kuznetsova I. N., Olenikov V. G. Production of copper concentrate during beneficiation of iron ores. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023, vol. 29, no. 1, pp. 5–15. [In Russ]. DOI: 10.17073/0021-3438-2023-1-5-15.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Махно Николай Артемович – аспирант, Иркутский национальный исследовательский технический университет, e-mail: Makhno\_N\_A@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

N.A. Makhno, Graduate Student, Irkutsk National Research Technical University, 664074, Irkutsk, Russia, e-mail: Makhno\_N\_A@mail.ru.

Получена редакцией 10.12.2025; получена после рецензии 29.04.2026; принята к печати 10.07.2026.

Received by the editors 10.12.2025; received after the review 29.04.2026; accepted for printing 10.07.2026.