

К ВОПРОСУ О ТОНКОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Л. С. Адамова, Ю. В. Дмитрак✉

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация
✉ dmitrak@yandex.ru

Аннотация: В обогащении полезных ископаемых основная задача процессов измельчения заключается в раскрытии ценных минералов для упрощения последующих этапов рудоподготовки, таких как флотация. Традиционно проектирование и оптимизация схем измельчения основывались на достижении заданного распределения размеров частиц при оптимальной производительности с учетом энергоэффективности и износа оборудования. Однако современные исследования в области флотации и минералогии поднимают вопрос о том, можно ли повысить требования к процессам измельчения в части подготовки частиц.

Ключевые слова: тонкое и сверхтонкое измельчение, обогащение полезных ископаемых, измельчение, флотация, минеральное сырье, дезинтеграторы

Для цитирования: Адамова Л. С., Дмитрак Ю. В. К вопросу о тонком измельчении минерального сырья. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024;(6):132-137. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_6_132_137.

ON THE ISSUE OF FINE GRINDING OF MINERAL RAW MATERIALS

L. S. Adamova, Yu. V. Dmitrak✉

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
✉ dmitrak@yandex.ru

Abstract: In mineral processing, the main task of grinding processes is to release valuable minerals to simplify subsequent separation steps such as flotation. Traditionally, the design and optimization of grinding schemes were based on achieving a predetermined particle size distribution with optimal performance, considering energy efficiency and equipment wear. However, modern research in the field of flotation and mineralogy raises the question of whether it is possible to increase the requirements for grinding processes in terms of particle preparation.

Keywords: Fine and ultrafine grinding, mineral processing, crushing, flotation, mineral raw materials, disintegrators

For citation: Adamova L. S., Dmitrak Yu. V. On the issue of fine grinding of mineral raw materials. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(6):132-137. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_6_132_137.

Введение

Тонкое и сверхтонкое измельчение минерального сырья является важным этапом в горнодобывающей и перерабатывающей промышленности. Процесс измельчения влияет на эффективность последующих операций, таких как флотация, гравитационное обогащение и гидрометаллургия. В условиях современного производства высокие требования к производительности и качеству конечного продукта требуют применения высокоинтенсивных методов измельчения. В связи с постоянным истощением запасов рудных тел с высоким содержанием металла, модернизируются более сложные, тонкодисперсные рудные тела, что привело к увеличению распространенности тонкого измельчения.

Поскольку удельная энергия, необходимая для измельчения, экспоненциально возрастает с увеличением тонкости продукта, энергоэффективность всегда является предметом особого внимания в процессе тонкого измельчения.

Работа демонстрирует, как инструменты технологической минералогии могут быть применены в контексте измельчения для получения информации о механизмах разрушения при тонком измельчении в шаровых и стержневых мельницах.

Цель исследований: оценка влияния тонкого измельчения в шаровых и стержневых мельницах на раскрытие ценных минералов и характеристики формы частиц руды.

Методы и материалы исследований

Для тонкого измельчения энергоэффективность является наиболее значительным преимуществом мельниц с перемешиванием по сравнению с традиционными мельницами с вращением, которое останется одним из доминирующих факторов, влияющих на принятие решений, касающихся конструкции и эксплуатации мельниц. В то время как энергоемкость шаровых мельниц ограничена требованием силы

тяжести для разрушения, в мельницах с перемешиванием энергия передается загрузке с помощью импеллера, что позволяет достичь гораздо более высокой энергоемкости [1].

При переработке руд минералов платиновой группы (PGM) мельницы с перемешиванием используются как для основного измельчения с высокой производительностью, так и для доизмельчения концентрата с низкой производительностью. При основном обогащении мельница IsaMill (горизонтально ориентированная мельница) обычно устанавливается в качестве дополнительной третичной стадии измельчения после первичной и вторичной шаровых мельниц. Вертикальные мельницы с перемешиванием, такие как Stirred Media Detritor (SMD) или Vertimill, в основном используются для доизмельчения концентрата в горно-металлургической промышленности [2].

Механизмы разрушения в мельницах с перемешиванием - независимо от ориентации мельницы, - обычно описываются как истирание и истишение [3-6] или более просто «сдвиговое» разрушение [7]. Доминирующим механизмом разрушения в шаровых мельницах обычно считается ударное разрушение во входной части мельницы. Хотя недавние работы по DEM привели к наблюдениям, что доминирующими являются низкоэнергетические повторяющиеся контакты в основной части загрузки, вызывающие накопление повреждений и постепенное разрушение [8-9].

Рис. 1 иллюстрирует эти механизмы разрушения и соответствующую терминологию, обращая внимание на то, как механизмы разрушения могут влиять на освобождение.

Понимание этих механизмов разрушения (которые зависят от характеристик руды) важно для моделирования и симуляции схем измельчения для проектирования и оптимизации, особенно если необходимо предсказать их влияние на процесс высвобождения. Подходы к изучению этих механизмов разрушения включают вычислительные методы,

такие как DEM и CFD [4,9,10] а также экспериментальные методы, в которых распределение частиц по размерам, их форма и характеристики высвобождения используются для получения представления о механизмах [6, 11-17]. Большинство этих работ было посвящено относительно крупному измельчению (>150 мкм), поэтому понимание механизмов разрушения в области тонкого измельчения, имеющего отношение к переработке PGM, остается ограниченным.

Минеральное зерно определяется как трехмерное образование, состоящее только из одной минеральной фазы: частицы, состоящие из одного, двух или более зерен, определяются как высвобожденные, двоичные и составные частицы соответственно.

Расщепление также иногда классифицируется как механизм разрушения, хотя в разных областях этот термин имеет разные значения. Общее описание, данное Кингом [19], гласит, что расщепление происходит, когда исходное твердое тело имеет некоторые предпочтительные поверхности, вдоль которых может произойти разрушение. В минералогии эти предпочтительные поверхности представляют собой плоскости слабости в кристаллической структуре, продиктованные расположением атомов. Количество и ориентация плоскостей спайности в минерале используются в качестве диагностического свойства для идентификации минерала. В минералогии излом и спайность являются взаимоисключающими понятиями: неравномерное разрушение считается изломом, а разрушение вдоль регулярных поверхностей, связанных с кристаллической структурой, называется спайностью.

Хотя понимание механизмов разрушения важно для проектирования и оптимизации схем измельчения, характеристики частиц-потомков, такие как распределение по размерам, форма и характеристики высвобождения, играют фундаментальную роль в последующих операциях переработки, таких как флотация. Поэтому понимание



Рис. 1. Механизмы разрушения - определения и терминология, подчеркивающие предполагаемые связи между событиями при контакте (приложением силы) и результатом разрушения [18] /

Fig. 1. Failure mechanisms - definitions and terminology highlighting the proposed relationships between contact events (force application) and the failure outcome [18]

возможного влияния механизмов разрушения в различных типах мельниц на эти свойства также может внести ценный вклад.

Определение формы частиц с помощью автоэмиссионной спектроскопии.

При размерах частиц, обычно связанных с тонким измельчением при переработке минералов (<75 мкм), возможности для количественной характеристики формы частиц ограничены, и особое значение имеет влияние разрешения полученных изображений [20]. Сканирующие электронные микроскопы обеспечивают более высокое разрешение, чем оптические приборы динамического анализа изображений, что позволяет анализировать более мелкие частицы. Поскольку текстура руды и структура минералов влияют на форму частиц, соответствующая минералогическая информация, получаемая с помощью Auto-SEM-EDS, является дополнительным преимуществом технологии.

Измерение и анализ полного распределения частиц по размерам образца необходимы для понимания и интерпретации влияния размера частиц, и возможность измерения и представления формы частиц с помощью распределения также важна. Это возможно с помощью тысяч изображений частиц, полученных с помощью Auto-SEM-EDS, используя простые геометрические дескрипторы (которые не полагаются на измерения по периметру), чтобы присвоить числовое значение каждой частице. Округлость - это такой дескриптор, который представляет собой отношение площади поперечного сечения частицы к площади круга/сферы с диаметром, эквивалентным максимальному диаметру Ферета (FeMax) частицы. Дескриптор округлости, используемый в данной работе, представлен в (1).

$$\text{Roundness} = \frac{4 \cdot \text{Area}}{\pi \cdot \text{Fe}_{\text{max}}^2}, \quad (1)$$

где Area — площадь поперечного сечения частицы;

Fe_{max}^2 — площадь круга/сферы с диаметром, эквивалентным максимальному диаметру Ферета (FeMax) частицы.

Следует отметить, что некоторые авторы используют это же название для других дескрипторов [21, 22] Вопросы, связанные с разрешением, стереологией, случайной ориентацией и неопределенностью, связанные с Auto-SEM-EDS характеристикой формы, были рассмотрены в работе [20].

В работе [23] оценено влияние тонкого измельчения в шаровых и стержневых мельницах на раскрытие ценных минералов и характеристики формы частиц руды. Автоматизированная сканирующая электронная микроскопия с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (Auto-SEM-EDS) использовалась для минералогического анализа и определения формы частиц в образцах кормов и продуктов. Работа демонстрирует, как инструменты технологической минералогии могут быть применены в контексте измельчения для получения информации о механизмах разрушения при тонком измельчении в шаровых и стержневых мельницах. В работе было выявлено, что большая разница в энергозатратах между двумя типами мельниц не оказывает существенного влияния на форму получаемого продукта. Исключением из этого наблюдения — лабораторная шаровая мельница, в которой продукт в верхней размерной фракции становился более вытянутым по мере увеличения времени измельчения в лабораторной мельнице периодического действия.

Такая же тенденция не наблюдалась в более мелких размерных фракциях. Частицы продукта, полученные в обеих мельницах тонкого помола, были либо такими же, либо более угловатыми, чем частицы исходного материала, с очень небольшой долей округлых зёрен. Термин «истирание», связанный с механизмом, с помощью которого крупные частицы в мельнице становятся более округлыми, имеет значение, которое может ввести в заблуждение при применении к тонкому измельчению. Если разрушение вызвано сдвигом, нельзя напрямую утверждать, что преобладающим механизмом разрушения будет постепенное истирание частиц с локальным разрушением по краям частиц. Анализ текстуры, формы и раскрытия частиц важен для определения взаимосвязи между энергозатратами, распределением частиц по размерам и высвобождением, чтобы в полной мере использовать преимущества раннего высвобождения и снизить эксплуатационные расходы [23].

Перспективы совершенствования технологии тонкого измельчения связаны с разработкой комплексных систем оборудования, объединяющих мельницы различных типов. Эффективность сочетания технологий обусловлена сокращением количества отходов, образующихся при дроблении и тонком измельчении минерального сырья, а также снижением многогранного негативного воздействия на окружающую среду. Улучшение процессов механического измельчения, учитывая их высокую энергоёмкость, зачастую играет ключевую роль в развитии технологий добычи и переработки твердых минеральных ресурсов [24].

Практика использования мельниц в горнодобывающей промышленности подтверждает их эффективность при измельчении твердых материалов, особенно благодаря комбинированию в рамках единого процесса подготовки сырья для производства конечной продукции. Динамические параметры, возникающие в помольных камерах, могут быть зарегистрированы с помощью прямого измерения с использованием пьезоэлектрических вибропреобразователей. Алгоритм, разработанный для усовершенствования мельниц, описывает процесс комплексной оптимизации их работы.

Исследование эффективности сочетания мельниц для тонкого измельчения горных пород, основанное на критерии выхода активной фракции, может стать предметом дальнейших научных изысканий.

Результаты исследований

Проведенное исследование позволило оценить эффективность тонкого измельчения в шаровых и стержневых мельницах, сосредоточив внимание на раскрытии ценных минералов и характеристиках формы частиц руды. Установлено, что различия в энергозатратах между двумя типами мельниц не оказывают существенного влияния на форму конечного продукта. За исключением лабораторной шаровой мельницы, где при увеличении времени измельчения наблюдается вытягивание частиц в крупных размерных фракциях. Однако в мелких фракциях эта тенденция отсутствует. Продукты, полученные в обеих мельницах, сохраняют угловатую форму, которая либо сопоставима с формой исходного материала, либо более выражена. Это противоречит традиционному представлению о постепенном округлении частиц при истирании, особенно если разрушение вызвано сдвиговыми нагрузками.

Использование автоматизированной сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным анализом (Auto-SEM-EDS) продемонстрировало важность анализа

текстуры, формы и раскрытия частиц для оптимизации процессов флотации и переработки руды. Механизмы разрушения, такие как истирание и сдвиговое разрушение, по-разному влияют на характеристики частиц, что необходимо учитывать при проектировании и совершенствовании схем измельчения. В шаровых мельницах доминирующим механизмом остается ударное разрушение, хотя внутри загрузки чаще происходят низкоэнергетические повторяющиеся контакты, приводящие к постепенному разрушению.

Результаты также показали, что понимание взаимосвязей между энергозатратами, распределением размеров частиц и их раскрытие имеет решающее значение для повышения эффективности измельчения. Это открывает возможности для более раннего раскрытия минералов, сокращения эксплуатационных расходов и улучшения работы мельниц.

Таким образом, интеграция различных типов мельниц, их энергоэффективности и механизмов разрушения создает основу для дальнейшего совершенствования технологий тонкого измельчения.

Обсуждение результатов

Обсуждение результатов показывает, что выбор типа мельницы и понимание механизмов разрушения играют ключевую роль в оптимизации процессов тонкого измельчения. Несмотря на значительные различия в конструкции и энергозатратах между шаровыми и стержневыми мельницами, их влияние на форму частиц оказалось менее выраженным, чем ожидалось. Это свидетельствует о сложной взаимосвязи между энергозатратами и характеристиками измельченного продукта, что требует дальнейшего изучения. Исключением является лабораторная шаровая мельница, где вытянутая форма частиц крупных фракций демонстрирует влияние времени обработки на характеристики продукта. Однако эта тенденция отсутствует в мелких фракциях, что подчеркивает неоднородность процессов разрушения.

Использование Auto-SEM-EDS для анализа частиц подтвердило важность формы и текстуры на последующих стадиях переработки, таких как флотация. Полученные данные показали, что угловатая форма частиц, характерная для продуктов обеих мельниц, может быть связана с преобладанием сдвиговых разрушений, которые отличаются от традиционного истирания. Этот вывод важен для проектирования процессов, поскольку форма и раскрытие частиц

существенно влияют на их поведение в последующих стадиях переработки.

Результаты подчеркивают необходимость разработки новых подходов к моделированию и симуляции схем измельчения, включающих детальный учёт механизмов разрушения. Интеграция этих знаний с инженерными решениями может повысить энергоэффективность и снизить эксплуатационные расходы. Кроме того, установлено, что использование различных типов мельниц в едином технологическом процессе открывает перспективы для повышения эффективности, минимизации отходов и снижения негативного воздействия на окружающую среду.

Заключение

1. Исследование тонкого измельчения минерального сырья подтверждает его ключевую роль в повышении эффективности перерабатывающих процессов и улучшении качества конечной продукции.

2. Результаты данной работы показывают, что выбор типа мельницы, например шаровой или стержневой, а также понимание механизмов разрушения являются решающими факторами, влияющими на характеристики формы и текстуры частиц. Установлено, что преобладающий механизм разрушения — сдвиг, характерный для мельниц с перемешиванием, способствует формированию угловатых частиц, что важно для последующих стадий переработки, таких как флотация.

3. Анализ энергоэффективности различных типов мельниц подтвердил перспективность использования инновационных подходов к комбинированию оборудования, что позволяет оптимизировать процессы измельчения. Дальнейшее развитие технологий тонкого измельчения связано с созданием комплексных систем, объединяющих мельницы различных типов, а также с совершенствованием методов моделирования и симуляции для проектирования энергоэффективных и экологически устойчивых схем переработки.

4. Таким образом, тонкое измельчение минерального сырья остается одной из наиболее актуальных задач горнодобывающей и перерабатывающей промышленности. Полученные данные вносят вклад в развитие этой области, подчеркивая необходимость дальнейших исследований, направленных на повышение эффективности переработки сложных минеральных ресурсов в условиях истощения запасов высококачественных руд.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jankovic, A. Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills / A. Jankovic // Minerals Engineering. — 2003. — № 16 (4). — P. 337-345. — DOI: 10.1016/S0892-6875(03)00007-4.
2. Войлошников, Г. И. Агитируемые мельницы тонкого и сверхтонкого измельчения для последующих обогатительно-металлургических операций / Г. И. Войлошников, А. Ю. Чикин // iPolytech Journal. — 2024. — Т. 28 № 3. — С. 504-512. — <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-504-512>.
3. Gao, M. Prediction of product size distributions for a stirred ball mill / M. Gao, E. Forssberg // Powder Technology. — 1995. — Vol. 84. — P. 101-106. — DOI: 10.1016/0032-5910(95)02990-J.
4. Sinnott, M. Analysis of stirred mill performance using DEM simulation: Part 1—Media motion, energy consumption and collisional environment / M. Sinnott, P. W. Cleary, R. Morrison // Minerals Engineering. — 2006. — Vol. 19 (15). — P. 1537-1550. — DOI: 10.1016/j.mineng.2006.08.012.
5. Wills' Mineral Processing Technology / B. A. Wills, T. Napier-Munn. - Elsevier Science & Technology Books, 7th ed. 2006.
6. Regrinding sulphide minerals—breakage mechanisms in milling and their influence on surface properties and flotation behavior / X. Ye, S. Gredelj, W. Skinner, S. R. Grano // Powder Technology. — 2010. — Vol. 203 (2). — P. 133-147. — DOI: 10.1016/j.powtec.2010.05.002.
7. Radziszewski, P. Assessing the stirred mill design space / P. Radziszewski // Minerals Engineering. — 2013. — Vol. 41. — P. 9-16. — DOI: 10.1016/j.mineng.2012.10.012.
8. Tavares, L. M. Analysis of particle fracture by repeated stressing as damage accumulation / L. M. Tavares // Powder Technology. — 2009. — Vol. 190 (3). — P. 327-339. — DOI: 10.1016/j.powtec.2008.08.011.

9. The contribution of DEM to the science of comminution / N. S. Weerasekara, M. S. Powell, P. W. Cleary et al. // *Powder Technology*. — 2013. — Vol. 248. — P. 3-24. — DOI: 10.1016/j.powtec.2013.05.032.
10. Cleary, P. W. Analysis of stirred mill performance using DEM simulation: Part 2 — Coherent flow structures, liner stress and wear, mixing and transport / P. W. Cleary, M. Sinnott, R. Morrison // *Minerals Engineering*. — 2006. — Vol. 19 (15). — P. 1551-1572. DOI: 10.1016/j.mineng.2006.08.013.
11. Particle morphology of ground gibbsite in different grinding environments / C. Frances, N. Le Bolay, K. Belaroui, M.-N. Pons // *International Journal of Mineral Processing*. — 2001. — Vol. 61 (1). — P. 41-56. — DOI: 10.1016/S0301-7516(00)00025-9.
12. Gao, M. Prediction of product size distributions for a stirred ball mill / M. Gao, E. Forssberg // *Powder Technology*. — 1995. — Vol. 84. — P. 101-106. — DOI: 10.1016/0032-5910(95)02990-J.
13. Kaya, E. Particle shape modification in comminution / E. Kaya, R. Hogg, S. R. Kumar // *KONA Powder and Particle Journal*. — 2002. — No20. — P. 188-195. — DOI: 10.14356/kona.2002021.
14. Effect of operational parameters on the breakage mechanism of silica in a jet mill / S. Palaniandy, K. A. M. Azizli, H. Hussin, S. F. S. Hashim // *Minerals Engineering*. — 2008. — Vol. 21 (5). — P. 380-388. — DOI: 10.1016/j.mineng.2007.10.011.
15. Roufail, R. A. The Effect of Stirred Mill Operation on Particles Breakage Mechanism and their Morphological Features / R. A. Roufail. - The University of British Columbia, 2011. — 283 p.
16. Identification of the fragmentation mechanisms in wet-phase fine grinding in a stirred bead mill / C. Varinot, S. Hiltgun, M. N. Pons, J. Dodds // *Chemical Engineering Science*. — 1997. — Vol. 52, No. 20. — P. 3605-3612.
17. The effect of breakage mechanism on the mineral liberation properties of sulphide ores / T. G. Vizcarra, E. M. Wightman, N. W. Johnson, E. V. Manlapig // *Minerals Engineering*. — 2010. — Vol. 23. — P. 374-382. — DOI: 10.1016/j.mineng.2009.11.012.
18. Using mineralogical and particle shape analysis to investigate enhanced mineral liberation through phase boundary fracture / L. Little, A. N. Mainza, M. Becker, J. G. Wiese // *Powder Technology*. — 2016. — Vol. 301. — P. 794-804. — DOI 10.1016/j.powtec.2016.06.052.
19. King R. P. Modeling & Simulation of Mineral Processing Systems. - Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001. - 414 p.
20. Auto-SEM particle shape characterisation: Investigating fine grinding of UG2 ore / L. Little, M. Becker, J. Wiese, A. N. Mainza // *Minerals Engineering*. — 2015. — Vol. 82. — P. 92-100. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.03.021.
21. Influence of the roughness and shape of quartz particles on their flotation kinetics / M. Rahimi, F. Dehghani, B. Rezai, M. R. Aslani // *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*. — 2012. — Vol. 19. — P. 284-289. — DOI: 10.1007/s12613-012-0552-z.
22. *Ulusoy, U.* Determination of the shape, morphological and wettability properties of quartz and their correlations / U. Ulusoy, M. Yekeler, C. Hıçıl-maz // *Minerals Engineering*. — 2003. — Vol. 16 (10). — P. 951-964. DOI: 10.1016/j.mineng.2003.07.002.
23. Fine grinding: How mill type affects particle shape characteristics and mineral liberation / L. Little, A. N. Mainza, M. Becker, J. Wiese // *Minerals Engineering*. — 2017. — Vol. 111. — P. 148-157. — <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.05.007>.
24. *Дмитрак, Ю. В.* Комбинирование мельниц для тонкого измельчения горных пород / Ю. В. Дмитрак // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. — 2021. — № 2. — С. 179-190.

REFERENCES

1. Jankovic A. Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills. *Minerals Engineering*. 2003;16(4):337-45. DOI: 10.1016/S0892-6875(03)00007-4.
2. Voiloshnikov GI, Chikin AYu. Stirred media mills of fine and ultrafine grinding for subsequent beneficiation operations. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):504-12 (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-504-512>.
3. Gao M, Forssberg E. Prediction of product size distributions for a stirred ball mill. *Powder Technology*. 1995;84:101-06. DOI: 10.1016/0032-5910(95)02990-J.
4. Sinnott M, Cleary PW, Morrison R. Analysis of stirred mill performance using DEM simulation: Part 1—Media motion, energy consumption and collisional environment. *Minerals Engineering*. 2006;19(15):1537-50. DOI: 10.1016/j.mineng.2006.08.012.
5. Wills BA, Napier-Munn. Wills' Mineral Processing Technology. Elsevier Science & Technology Books, 7th ed., 2006.
6. Ye X, Gredelj S, Skinner W, et al. Regrinding sulphide minerals—breakage mechanisms in milling and their influence on surface properties and flotation behavior. *Powder Technology*. 2010;203(2):133-47. DOI: 10.1016/j.powtec.2010.05.002.
7. Radziszewski P. Assessing the stirred mill design space. *Minerals Engineering*. 2013;41:9-16. DOI: 10.1016/j.mineng.2012.10.012.
8. Tavares LM. Analysis of particle fracture by repeated stressing as damage accumulation. *Powder Technology*. 2009;190(3):327-39. DOI: 10.1016/j.powtec.2008.08.011.
9. Weerasekara NS, Powell MS, Cleary PW, et al. The contribution of DEM to the science of comminution. *Powder Technology*. 2013;248:3-24. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.05.032.
10. Cleary PW, Sinnott M, Morrison R. Analysis of stirred mill performance using DEM simulation: Part 2 — Coherent flow structures, liner stress and wear, mixing and transport. *Minerals Engineering*. 2006;19(15):1551-72. DOI: 10.1016/j.mineng.2006.08.013.
11. Frances C, Le Bolay N, Belaroui K, et al. Particle morphology of ground gibbsite in different grinding environments. *International Journal of Mineral Processing*. 2001;61(1):41-56. DOI: 10.1016/S0301-7516(00)00025-9.
12. Gao M, Forssberg E. Prediction of product size distributions for a stirred ball mill. *Powder Technology*. 1995;84:101-06. DOI: 10.1016/0032-5910(95)02990-J.
13. Kaya E, Hogg R, Kumar SR. Particle shape modification in comminution. *KONA Powder and Particle Journal*. 2020;20:188-95. DOI: 10.14356/kona.2002021.
14. Palaniandy S, Azizli KAM, Hussin H, et al. Effect of operational parameters on the breakage mechanism of silica in a jet mill. *Minerals Engineering*. 2008;21(5):380-88. DOI: 10.1016/j.mineng.2007.10.011.
15. Roufail RA. The Effect of Stirred Mill Operation on Particles Breakage Mechanism and their Morphological Features. The University of British Columbia, 2011.
16. Varinot C, Hiltgun S, Pons M-N, et al. Identification of the fragmentation mechanisms in wet-phase fine grinding in a stirred bead mill. *Chemical Engineering Science*. 1997;52(20):3605-12.
17. Vizcarra TG, Wightman EM, Johnson NW, et al. The effect of breakage mechanism on the mineral liberation properties of sulphide ores. *Minerals Engineering*. 2010;23(5):374-82. DOI: 10.1016/j.mineng.2009.11.012.
18. Little L, Mainza AN, Wiese JG, et al. Using mineralogical and particle shape analysis to investigate enhanced mineral liberation through phase boundary fracture. *Powder Technology*. 2016;301:794-804. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.06.052.
19. King RP. Modeling & Simulation of Mineral Processing Systems. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001.
20. Little L, Becker M, Wiese J, et al. Auto-SEM particle shape characterisation: Investigating fine grinding of UG2 ore. *Minerals Engineering*. 2015;82:92-100. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.03.021.

21. Rahimi M, Dehghani F, Rezai B, et al. Influence of the roughness and shape of quartz particles on their flotation kinetics. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*. 2012;19:284-89. DOI: 10.1007/s12613-012-0552-z.
22. Ulusoy U, Yekeler M, Hıçyılmaz C. Determination of the shape, morphological and wettability properties of quartz and their correlations. *Minerals Engineering*. 2003;16(10):951-64. DOI: 10.1016/j.mineng.2003.07.002.
23. Little L, Mainza AN, Becker M, et al. Fine grinding: How mill type affects particle shape characteristics and mineral liberation. *Minerals Engineering*. 2017;111:148-57. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.05.007>.
24. Dmitrak YuV. Combining mills for fine grinding of rocks. *News of TulSU. Earth Sciences*. 2021;2:179-90 (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Людмила Станиславовна Адамова —
младший научный сотрудник, аспирант направления
«Геотехнология. Горные машины», ИПКОН РАН, 111020, г.
Москва, Российская Федерация,
e-mail: adamovamila16@yandex.ru

Юрий Витальевич Дмитрак —
главный научный сотрудник, профессор, доктор технических
наук, начальник отдела Моделирования и управления
горнотехническими системами ИПКОН РАН, 111020,
г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: dmitrak@yandex.ru

Критерии авторства / Contribution:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей / The authors participated equally in the writing and collection of the material, as well as its processing.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 03.11.2024.

Поступила после рецензирования: 24.11.2024.

Принята к публикации: 29.11.2024.

Article info

Received: 03.11.2024.

Revised: 24.11.2024.

Accepted: 29.11.2024.

ABOUT THE AUTHORS

Liudmila S. Adamova —
a junior researcher, a postgraduate student in the field of
«Geotechnology. Mining machines», Institute of Comprehensive
Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences,
Moscow, 111020, Russian Federation, e-mail: adamovamila16@
yandex.ru

Yuri V. Dmitrak —
Chief Researcher, Professor, Dr. Sci. (Eng.), Head of the
Department of Modeling and Management of Mining Systems,
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
Russian Academy of Sciences, Moscow, 111020, Russian
Federation, e-mail: dmitrak@yandex.ru