

УДК 622.7

**ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ
ЦЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ ПРИРОДНОГО
И ТЕХНОГЕННОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

В. И. Ростовцев

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: benevikt@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Предложена методика расчета минимального времени облучения руд и техногенного сырья, содержащих полиминеральные сростки, а также размеров зерен, для которых предельные напряжения достигаются на границе их раздела. С учетом результатов расчета механических напряжений намечены пути повышения извлечения тонких частиц ценных компонентов из минерального сырья.

Минеральное сырье, радиационная модификация, селективность дезинтеграции, раскрытие полезных минералов, флотация, повышение извлечения ценных компонентов

DOI: 10.15372/FTPRPI20210413

Переработка минерального сырья в России обеспечивает более 30 % внутреннего валового продукта и более 70 % валютных поступлений в бюджет страны. Это является свидетельством того, что благополучие страны, в том числе экономическое, зависит от состояния и эффективности использования минерально-сырьевой базы. Ее развитие в настоящее время основано на широком вовлечении в промышленное освоение труднообогатимых руд и техногенных ресурсов с низким содержанием ценных компонентов, тонкой вкрапленностью и близкими технологическими свойствами разделяемых минералов.

В [1] указывается, что вводимые в эксплуатацию месторождения характеризуются сложными горно-геологическими условиями разработки и большой глубиной залегания, что требует развития и создания новых методов и средств изучения геодинамических и геомеханических процессов при освоении недр для предотвращения горных ударов и внезапных выбросов горных пород, реализации экологически безопасных технологий. Вероятность открытия новых крупных и богатых месторождений невелика. Расширение минерально-сырьевой базы России возможно за счет вовлечения в разработку труднообогатимых забалансовых руд и нетрадиционного минерального сырья, включая техногенные образования.

Для таких видов минерального сырья одним из основных технологических процессов переработки является флотация [2]. Ее совершенствование — актуальная задача, решение которой базируется на фундаментальных исследованиях с использованием современных физических и физико-химических методов анализа с высокой разрешающей способностью, новых методических подходов для изучения состава, структуры и свойств минеральных объектов на микро- и наноуровне, фазовых и химических преобразований минералов при формировании адсорбционного слоя на минеральных частицах, в том числе при различных видах энергетических воздействий.

Как указывается в [3], в настоящее время предполагается рациональное использование природных и техногенных ресурсов, максимально эффективное энергосбережение, вторичная переработка всех отходов и получение из них новых товаров, сырья или энергии. Новой парадигмой становится самовосстанавливающаяся по своей природе экономика замкнутого цикла как способ организации жизни общества, направленного на ресурсо- и энергосбережение, на экологически чистое производство, не на разработку новых месторождений, а на максимальное использование ресурсного потенциала добываемого минерального сырья и уже накопленных отходов.

Техногенное минерального сырья — это горно-металлургические отходы, которые в соответствии с происхождением разделяются на два основных типа: отходы добычи полезных ископаемых и отходы переработки минерального сырья, существенно отличающиеся от природного минерального сырья по вещественному составу, технологическим свойствам, наличию новообразований, возникших при переработке и долговременном хранении [4]. Количество таких отходов в составе учтенных составляет соответственно 15–40 и 5–10% [5].

Основные массивы техногенного сырья первого типа характерны для Урала и Сибири. Об огромном ресурсном потенциале техногенных образований Урала можно судить по данным, приведенным в [6]. Горнопромышленные отходы занимают площадь более 15 тыс. га. Так, на Качканарском ГОКе накоплено более 1 млрд т хвостов магнитного обогащения руд, содержащих помимо железа, титана (0.30%), ванадия (0.03%) редкие металлы. В никелевых шлаках шахтных печей и конвертерной плавки АО «Южуралникель» содержание хрома достигает 1%, никеля — 0.13–0.15, кобальта — 0.03–0.06, железа — 50–60%. Эти шлаки в настоящее время не перерабатываются и не используются, составляя резерв минерально-сырьевой базы никеля и кобальта.

В Сибири одним из значимых видов минерального сырья является золото. В процессе переработки золотосодержащих руд на золотоизвлекательных фабриках образуются различные виды отходов. К ним относятся хвосты гравитационного обогащения золотосодержащих руд и шламы газоочистки отходящих газов плавильных отделений золотоизвлекательных фабрик, которые в виде пульпы направляются в хвостохранилище. В специальных частях хвостохранилищ временно складированы промпродукты, не являющиеся отвальными. Годовой выход хвостов обогатительных фабрик достигает 98%. Аварийные ситуации, связанные с переполнением емкости хвостохранилищ в результате выпадения осадков, с отказом насосного оборудования насосной станции оборотного водоснабжения, с потерей устойчивости низового откоса из-за нарушения целостности противотрационного экрана, могут приводить к загрязнению близлежащих территорий тяжелыми металлами и нефтепродуктами. Техногенные образования, содержащие значительные объемы ценных компонентов, одновременно представляют опасность для окружающей среды.

Следует отметить, что до 40 % потерь ценных компонентов в процессах первичной переработки полезных ископаемых связано со сложными сростками, до 35 % — с тонкими частицами крупностью менее 10 мкм [7].

Цель настоящей работы — поиск путей повышения извлечения микро- и наночастиц полезных компонентов из природного и техногенного минерального сырья.

СПЕЦИФИКА РУДОПОДГОТОВКИ И ОБОГАЩЕНИЯ ТРУДНООБОГАТИМОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Одним из эффективных методов, позволяющих перерабатывать такое минеральное сырье, является флотация. Важный фактор, обуславливающий эффективность флотационного процесса, — размер свободных зерен полезных минеральных частиц. Увеличение крупности извлекаемых флотацией частиц может повысить извлечение полезного компонента и сократить расходы на процесс обогащения руды. Например, расширение диапазона крупности частиц до 0.1–0.3 мм при флотации может дать экономию 30–50 % энергии, затрачиваемой в наиболее энергоемком переделе обогащения — процессе измельчения [8, 9].

Проведение научных исследований и реализация их результатов в направлении интенсификации существующих и создания новых высокоэффективных методов и способов извлечения ценных компонентов из труднообогатимого минерального сырья природного и техногенного происхождения определяется необходимостью решения следующих основных задач [10]: повышение полноты и комплексности использования месторождений твердых полезных ископаемых; обеспечение высокой рентабельности современного минерально-сырьевого комплекса страны и улучшение экологической ситуации в горнопромышленных регионах. Определяющие направления — совершенствование рудоподготовки, развитие теории элементарного акта флотации и разработка технологических процессов по очистке сточных вод горно-металлургических предприятий.

В [11] показано, что комбинированные технологии и технологические режимы с использованием энергетических воздействий и новой предсказательной модели флотации позволяют существенно расширить минерально-сырьевую базу страны, в том числе по ряду стратегических металлов. В ИГД СО РАН развиты научные основы использования немеханических энергетических воздействий в виде потока ускоренных электронов в процессах подготовки и обогащения труднообогатимого минерального сырья. Важной особенностью обработки ускоренными электронами неоднородных материалов и, в частности, руд является образование системы трещин по границам срастания зерен проводящих минералов и диэлектриков, что приводит к последующей селективной дезинтеграции и повышению производительности мельниц. В [12] установлено, что радиационная модификация свойств свинцово-цинковой руды позволяет повысить селективность ее измельчения и улучшить технологические показатели переработки. Выявлено, что при использовании радиационной обработки доля свободных зерен галенита и вюрцита в измельченном материале повышается с 40.7 и 65.7 до 66.4 и 71.5 % ускоренными электронами при дозе 5 кГр. При флотационном обогащении этой руды получен прирост извлечения цинка 4.74 и свинца 9.50 % в концентрат основной флотации.

С поиском новых методов извлечения полезных компонентов из труднообогатимого и техногенного сырья связана тематика XXX Международного конгресса по обогащению минерального сырья, проходившего в 2020 г. в г. Кейптауне (Южная Африка). Совершенствованию флотационного процесса посвящены доклады [13–15], в [16–20] приведены результаты по со-

вершенствованию процессов рудоподготовки. В них уделено внимание как интенсификации процесса измельчения минерального сырья предварительной его обработкой энергетическими воздействиями с учетом методов моделирования, так и созданию и разработке новых измельчительных аппаратов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОБЛУЧЕНИЯ УСКОРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ НА РУДНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

В [21] показано, что за счет изменения прочностных свойств минералов при радиационной обработке железных руд Михайловского ГОКа увеличиваются: коэффициент относительной измельчаемости руды — в 1.4–1.8 раза, содержание железа в концентрате — на 0.6–1.3 %, эффективность обогащения — на 0.9–3.0 % с одновременным снижением потерь железа в хвостах на 0.4–1.3 %.

В настоящей работе приведены результаты физического и математического моделирования воздействия высокоэнергетических электронов на основные компоненты труднообогатимого минерального сырья и их сростки при варьировании крупности минералов.

Учитывая текстурные особенности труднообогатимых руд, предположим, что минералы в них имеют шарообразную форму. Примем приведенную на рис. 1 схему обработки минерального сырья.

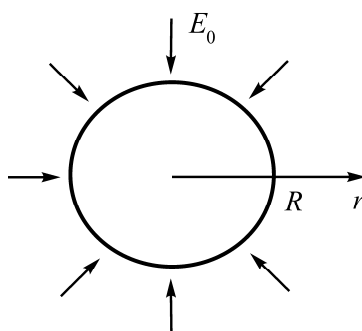


Рис. 1. Схема для расчета напряжений при обработке потоком высокоэнергетических электронов минерального сырья в виде однородного шара

Полагаем, что на поверхность шара радиусом R из однородного материала равномерно со всех сторон действует пучок высокоэнергетических электронов с плотностью энергии E_0 . Тепловое влияние на минеральное вещество моделируется внутренними источниками тепла, распределенными по закону Бугера – Ламберта:

$$E(r) = E_0 \exp(-dr),$$

где $E(r)$ — плотность энергии источника в точке с радиусом r ; d — линейный коэффициент поглощения потока электронов.

В силу симметрии температура T будет функцией только времени t и радиуса r . В сферической системе координат с началом в центре шара уравнение теплопроводности имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{a}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + bch(dr). \quad (1)$$

Здесь t — промежуток времени от начала облучения ускоренными электронами; T — температура в точке r в момент времени t ; $a = k / c\rho$, k — коэффициенты температуропроводности и теплопроводности, c — удельная теплоемкость, ρ — плотность минерального сырья; $b = 2E_0 d \exp(-dR) / c\rho$. Так как материал шара однородный, то k , c , ρ , d — постоянные величины.

Для решения уравнения (1) примем следующие условия:
начальное

$$T(r, 0) = T_0, \quad (2)$$

на поверхности шара при теплоотдаче с коэффициентом теплообмена λ :

$$\frac{\partial T}{\partial r} = -\lambda(T - T_0), \quad r = R. \quad (3)$$

Ограниченность решения уравнения (1) определяется условием

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad r = 0. \quad (4)$$

Вследствие симметрии рассматриваемого шарообразного минерального объекта ненулевыми будут только три компоненты тензора напряжения: радиальная составляющая σ_r и две окружные σ_t . Согласно [22], они определяются уравнениями:

$$\sigma_r = \frac{2\alpha E}{1-\nu} \left(\frac{1}{R^3} \int_0^R \Theta z^2 dz - \frac{1}{r^3} \int_0^r \Theta z^2 dz \right), \quad (5)$$

$$\sigma_t = \frac{\alpha E}{1-\nu} \left(\frac{2}{R^3} \int_0^R \Theta z^2 dz - \frac{1}{r^3} \int_0^r \Theta z^2 dz - T \right), \quad (6)$$

где α — коэффициент линейного расширения; E — модуль упругости; ν — коэффициент Пуассона материала шара; $\Theta = T - T_0$.

Для упрощения расчетов примем эти коэффициенты постоянными. Линейный коэффициент поглощения потока электронов с энергией 3 МэВ получается экстраполяцией данных из [23]. Значение $E_0 = 7.63 \cdot 10^5$ Вт/м² соответствует плотности потока энергии, получаемой на промышленных ускорителях Института ядерной физики СО РАН.

В соответствии с [24] при тепловом воздействии на горные породы температурами от 100 до 1000 К коэффициент теплоотдачи составляет 100–1000 Вт/м²·К. В расчетах $\lambda = 100$ м⁻¹. Краевая задача (1)–(4) решалась численно разностным методом с использованием аналога схемы Кранка–Николсона [25].

Как указывалось, в природных минеральных объектах полезные компоненты встречаются в виде сложных сростков или включений в пустую породу. С целью изучения возможности их селективного разрушения для последующего обогащения определена температура и напряженно-деформированное состояние твердого тела в следующей модельной постановке. Пусть шарообразное твердое тело R состоит из внутреннего шара размером $R_0 < R$ одного минерала, покрытого по поверхности слоем другого минерала (рис. 2).

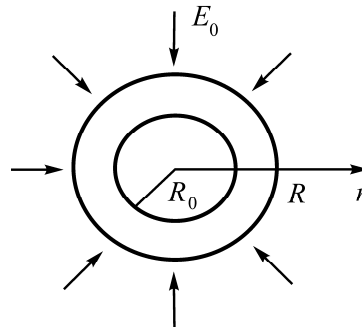


Рис. 2. Расчетная схема определения напряжений при обработке высокоэнергетическими электронами минерального сырья в виде неоднородного шара

Распределение температуры в этом случае будет описывать уравнение теплопроводности с разрывными коэффициентами:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial (kT)}{\partial r} \right) + F(r), \tag{7}$$

где $\rho = \rho_1, c = c_1, k = k_1$ при $0 \leq r \leq R_0$; $\rho = \rho_2, c = c_2, k = k_2$ при $R_0 \leq r \leq R$.

Функция $F(r)$ определяется выражениями:

$$F(r) = E_0 d_1 \exp(-d_2 (R - R_0)) \exp(-d_1 R_0) [\exp(d_1 r) + \exp(-d_1 r)], \quad 0 \leq r \leq R_0, \tag{8}$$

$$F(r) = E_0 d_2 [\exp(-d_2 (R - r)) + \exp(-d_2 (R - R_0)) \exp(-2d_1 R_0) \exp(-d_2 (r - R_0))], \quad R_0 \leq r \leq R \tag{9}$$

Здесь $\rho_1, \rho_2, c_1, c_2, k_1, k_2, d_1, d_2$ — плотность, теплоемкость, коэффициенты теплопроводности и поглощения потока электронов для минералов 1 и 2.

Начальные и краевые условия даны в (2)–(4). Считаем, что минералы 1 и 2 разделены бесконечно тонкой прослойкой, которая имеет известные пределы прочности на разрыв и сдвиг, не учитываемые в расчетах температуры и напряженно-деформированного состояния.

Аналогично приведенному анализу однородного шара ненулевыми будут компоненты тензора напряжений σ_{r1}, σ_{t1} — для внутреннего шара и σ_{r2}, σ_{t2} — для поверхностного слоя [25]:

для $0 \leq r \leq R_0$

$$\sigma_{r1} = -\frac{2\alpha_1 E_1}{1-\nu_1} \frac{1}{r^3} \int_0^r \Theta z^2 dz + \frac{E_1}{1-2\nu_1} C_1 - \frac{2E_1}{1+\nu_1} \frac{1}{r^3} C_4, \tag{10}$$

$$\sigma_{t1} = \frac{\alpha_1 E_1}{1-\nu_1} \frac{1}{r^3} \int_0^r \Theta z^2 dz + \frac{E_1}{1-2\nu_1} C_1 + \frac{E_1}{1+\nu_1} \frac{1}{r^3} C_4 - \frac{\alpha_1 E_1}{1-\nu_1} \Theta; \tag{11}$$

для $R_0 \leq r \leq R$

$$\sigma_{r2} = \frac{2\alpha_2 E_2}{1-\nu_2} \frac{1}{r^3} \int_{R_0}^r \Theta z^2 dz + \frac{E_2}{1-2\nu_2} C_2 - \frac{2E_2}{1+\nu_2} \frac{1}{r^3} C_3, \tag{12}$$

$$\sigma_{t2} = \frac{2\alpha_2 E_2}{1-\nu_2} \frac{1}{r^3} \int_{R_0}^r \Theta z^2 dz + \frac{E_2}{1-2\nu_2} C_2 + \frac{E_2}{1+\nu_2} \frac{1}{r^3} C_3 - \frac{\alpha_2 E_2}{1-\nu_2} \Theta, \tag{13}$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \nu_1, \nu_2$ — коэффициенты линейного температурного расширения и Пуассона; E_1, E_2 — модули упругости минералов 1 и 2; C_1, C_2, C_3, C_4 — постоянные, определяемые условиями:

$$\sigma_{r_1}(0), \sigma_{t_1}(0) \text{ — конечны.} \quad (14)$$

На свободной поверхности

$$\sigma_{r_2(R)} = 0. \quad (15)$$

Непрерывность радиальных напряжений определяется как

$$\sigma_{r_1}(R_0) = \sigma_{r_2}(R_0), \quad (16)$$

а неразрывность на границе раздела минералов — из соотношения

$$u_1(R_0) = u_2(R_0). \quad (17)$$

Здесь u_1, u_2 — радиальные перемещения минералов 1 и 2:

для $0 \leq r \leq R_0$

$$u_1(r) = \frac{1+\nu_1}{1-\nu_1} \alpha_1 \frac{1}{r^2} \int_0^r \Theta z^2 dz + C_1 r + \frac{C_4}{r^2}; \quad (18)$$

для $R_0 \leq r \leq R$

$$u_2(r) = \frac{1+\nu_2}{1-\nu_2} \alpha_2 \frac{1}{r^2} \int_{R_0}^r \Theta z^2 dz + C_2 r + \frac{C_4}{r^2}. \quad (19)$$

Условие (14) удовлетворяется при $C_4 = 0$, а (15)–(17) дают систему линейных уравнений для определения C_1, C_2, C_3 :

$$\begin{aligned} & -\frac{2\alpha_2 E_2}{1-\nu_2} \frac{1}{R_3} \int_{R_0}^R \Theta z^2 dz + \frac{E_2}{1-2\nu_2} C_2 - \frac{2E_2}{1+\nu_2} \frac{1}{R^3} C_3 = 0, \\ & -\frac{2\alpha_1 E_1}{1-\nu_1} \frac{1}{R_0^3} \int_0^{R_0} \Theta z^2 dz + \frac{E_1}{1-2\nu_1} C_1 = \frac{E_2}{1-2\nu_2} C_2 - \frac{2E_2}{1+\nu_2} \frac{1}{R_0^3} C_3, \\ & \frac{1+\nu_1}{1-\nu_1} \frac{\alpha_1}{R_0^2} \int_0^{R_0} \Theta z^2 dz + R_0 C_1 = R_0 C_2 + \frac{1}{R_0^2} C_3. \end{aligned}$$

Решение системы из трех уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} C_3 &= \frac{\frac{3\alpha_1}{R_0^3} \int_0^{R_0} \Theta z^2 dz - \frac{2\alpha_2}{1-\nu_2} \left(\frac{1-2\nu_2}{1-2\nu_1} - \frac{E_2}{E_1} \right) \frac{1}{R_3} \int_{R_0}^R \Theta z^2 dz}{\frac{2}{1+\nu_2} \left(\frac{1-2\nu_2}{1-2\nu_1} - \frac{E_2}{E_1} \right) \frac{1}{R_3} + \left(\frac{1}{1-2\nu_1} + \frac{2}{1+\nu_2} \frac{E_2}{E_1} \right) \frac{1}{R_0^3}}, \\ C_2 &= \frac{2(1-2\nu_2)}{R^3} \left(\frac{1}{1+\nu_2} C_3 + \frac{\alpha_2}{1-\nu_2} \int_{R_0}^R \Theta z^2 dz \right), \\ C_1 &= C_2 + \frac{1}{R_0^3} C_3 - \frac{1+\nu_1}{1-\nu_1} \alpha_1 \frac{1}{R_0^3} \int_0^{R_0} z^2 dz. \end{aligned}$$

Подставив полученное решение системы и C_4 в (10), (11) и (14), находим значение ненулевых напряжений во всех точках шара.

На рис. 3 для примера и проверки расчетов приведены графики температуры (1), радиальных (2) и окружных (3) напряжений для системы, состоящей из кварцевого шарика радиусом $R=5$ мм, внутри которого расположен минерал магнетит радиусом $R_0=3.5$ мм. Как следует из рис. 3, на поверхности раздела окружные напряжения имеют разрыв.

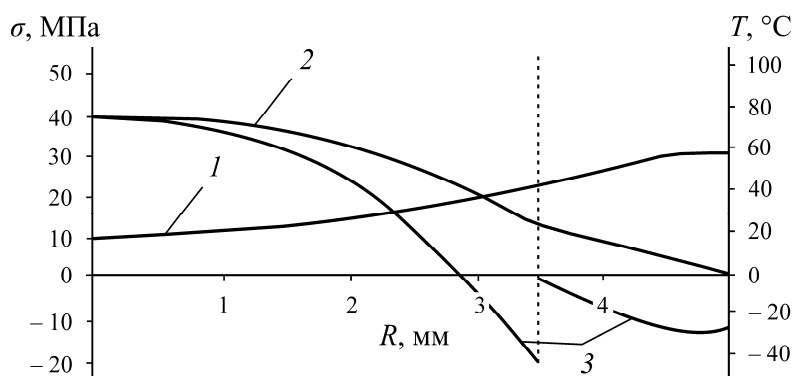


Рис. 3. Результаты расчета напряжений и температуры при обработке потоком высокоэнергетических электронов минерального сырья в виде однородного кварцевого шарика радиусом 5 мм, внутри которого расположен минерал магнетит радиусом 3.5 мм

Следует отметить, что при облучении сростков двух минералов ускоренными электронами возможны два варианта достижения предельного растягивающего значения напряжения: или внутри одного из минералов, или в разделяющей их бесконечно тонкой прослойке, что имеет большое значение при рассмотрении вопросов разделения минералов при переработке минерального сырья.

ВЫВОДЫ

Предложена методика физического моделирования напряженно-деформированного состояния отдельных мелких минеральных частиц и их комплексов при воздействии ускоренных электронов.

Полученные математические закономерности показывают, что для каждого минерала шарообразной формы существует определенный размер частиц, время обработки ускоренными электронами для которых минимально. При этом радиальные компоненты напряжений максимальны в центре шара, а окружные растягивающие напряжения в центральной части сменяются сжимающими у его поверхности.

Показано, что при облучении сложных сростков двух минералов предельные растягивающие напряжения могут возникать или внутри одного из минералов шарообразной формы, или в прослойке между ними. Анализ механических напряжений позволяет определить направления интенсификации процесса разделения тонких частиц различных минералов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чантурия В. А. Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья сложного вещественного состава // Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения–2020). — Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2020. — С. 3–4.

2. **Матвеева Т. Н.** Современное состояние и перспективы расширения ассортимента флотационных реагентов для извлечения благородных металлов из упорного минерального сырья // Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения–2020). — Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2020. — С. 14–17.
3. **Новая технологическая революция: вызовы и возможности для России.** Экспертно-аналитический доклад. — М., 2017. — 136 с.
4. **Горлова О. Е.** Обоснование комбинированных технологий переработки техногенного металлсодержащего минерального сырья // Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в XXI веке (Плаксинские чтения–2019). — Иркутск: ООО “Репроцентр А1”, 2019. — С. 371–375.
5. **Шадрунова И. В., Зелинская Е. В., Волкова Н. А., Орехова Н. Н.** Горнопромышленные отходы: ресурсный потенциал и технологии переработки (на примере Сибири и Урала) // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения–2017). — Красноярск: СФУ, 2017. — С. 15–21.
6. **Орехова Н. Н., Шадрунова И. В., Зелинская Е. В., Волкова Н. А.** Ресурсы техногенного минерального сырья Урала и Сибири: основные результаты исследований, перспективы их освоения // Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения–2020). — Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2020. — С. 24–28.
7. **Чантурия В. А., Козлов А. П.** Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения–2017). — Красноярск: СФУ, 2017. — С. 3–6.
8. **Tabosa E., Runge K., and Duffy K.-A.** Strategies for increasing coarse particle flotation in conventional flotation cells, Proc. the 6th Int. Flotation Conf., Cape Town, South Africa, 2013.
9. **Кондратьев С. А., Мошкин Н. П.** Взаимодействие минеральной частицы со свободным пузырьком воздуха в жидкости // ФТПРПИ. — 2020. — № 6. — С. 125–135.
10. **Чантурия В. А., Вайсберг Л. А., Козлов А. П.** Приоритетные направления исследований в области переработки минерального сырья // Обогащение руд. — 2014. — № 2. — С. 3–9.
11. **Кондратьев С. А., Ростовцев В. И., Коваленко К. А.** Развитие экологически безопасных технологий комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья // Горн. журн. — 2020. — № 5. — С. 39–46.
12. **Ростовцев В. И., Брызгин А. А., Коробейников М. В.** Повышение селективности измельчения и комплексности использования минерального сырья на основе радиационной модификации его свойств // ФТПРПИ. — 2020. — № 6. — С. 136–146.
13. **O'Connor C. T.** Review of important developments since the 1st IMPC in 1952 in the understanding of the effects of chemical factors on flotation, XXX Int. Mineral Proc. Congress IMPC 2020, 18–22 October, Cape Town, South Africa, 2020. — P. 1–26.
14. **Saavedra Moreno Y., Boumival G., and Ata S.** Comparing the froth stability of two-phase and three-phase systems for various frother types, XXX Int. Mineral Proc. Congress IMPC 2020, 18–22 October, Cape Town, South Africa, 2020. — P. 1021–1035.
15. **Ignatkina V. A., Shepeta E. D., Samatova L. A., Lygach A. V., and Aksenova D. D.** Increasing the contrast of flotation of finely disseminated calcium-bearing ores by using of combination low polar compounds and fatty acid collector, XXX Int. Mineral Proc. Congress IMPC 2020, 18–22 October, Cape Town, South Africa, 2020. — P. 1057–1068.
16. **Lieberwirth H. and Ktihnel L.** Influence of particle size on selectivity in confined bed comminution, XXX Int. Mineral Proc. Congress IMPC 2020, 18–22 October, Cape Town, South Africa, 2020. — P. 365–376.

17. **Kfichowicz M. and Lieberwirth H.** DEM simulation of particle bed comminution at grain size level, XXX Int. Mineral Proc. Congress IMPC 2020, 18–22 October, Cape Town, South Africa, 2020. — P. 352–364.
18. **Gao P., Qin Y., Han L., Han Y., and Li Y.** Weakening mechanical properties of Galena based on high-voltage pulse discharge, XXX Int. Mineral Proc. Congress IMPC 2020, 18–22 October, Cape Town, South Africa, 2020. — P. 402–412.
19. **Moodley T. and Govender I.** Experimental validation of DEM in rotating drums using Positron Emission Particle Tracking, XXX Int. Mineral Proc. Congress IMPC 2020, 18–22 October, Cape Town, South Africa, 2020. — P. 413–427.
20. **Oladele T. P., Bbosa L. B., and Weatherley D. K.** Numerical investigation on the effect of pre-existing cracks during impact breakage in a short impact load cell device, XXX Int. Mineral Proc. Congress IMPC 2020, 18–22 October, Cape Town, South Africa, 2020. — P. 494–501.
21. **Бочкарев Г. Р., Вейгельт Ю. П., Изотов А. С., Ростовцев В. И.** Радиационные термонапряжения в минералах и их роль в процессах обогащения магнетитовых кварцитов // ФТПРПИ. — 2001. — № 3. — С. 104–111.
22. **Тимошенко С. П., Гудьер Дж.** Теория упругости. — М.: Наука, 1975. — 576 с.
23. **Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г.** Справочник по элементарной физике. — М.: Наука, 1972. — 256 с.
24. **Дмитриев А. П., Гончаров С. А., Германович Л. Н.** Термическое разрушение горных пород. — М.: Недра, 1990. — 254 с.
25. **Флетчер К.** Вычислительные методы в динамике жидкостей. — М.: Мир, 1991. — Т. 1. — 552 с.

*Поступила в редакцию 15/V 2021
После доработки 29/VII 2021
Принята к публикации 30/VII 2021*