

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ НА ЭНЕРГЕТИКУ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В МЕЛЬНИЦАХ

В.И. Голик

Северо-Кавказский государственный технологический университет,  
Владикавказ, Россия, e-mail: v.i.golik@mail.ru

**Аннотация:** Актуальность проблемы объясняется необходимостью найти резервы улучшения показателей горного производства, снизить энергоемкость процессов дробления и тонкого измельчения твердых материалов в мельницах. Целью исследования является экспериментальная проверка корректности теории процессов дробления и тонкого измельчения твердых материалов в помольных камерах мельниц. Для описания процессов в мельнице используются физико-химические явления: фазовые переходы, термолиз, механоэмиссионные явления, точечные дефекты, дислокации и другие факторы, описываемые теорией короткоживущих активных центров. Обосновано перспективное направление решения проблемы, включающее снижение энергоемкости процессов дробления и тонкого измельчения твердых материалов при переработке в мельницах различных типов в рамках подготовки к использованию в производстве товаров. Выявлены основные проблемы тонкого измельчения твердых материалов в мельницах. Приведены сведения о лабораторном стенде на базе шаровой барабанной мельницы, позволившем выделить одиночные импульсы, записать их форму и произвести спектральный анализ. Приведены результаты экспериментального подтверждения теории процессов в помольных камерах мельниц с измерением параметров шаровой загрузки в зоне контакта мелющих тел с материалом, рассмотрены их применения к горным породам. Уточнены представления о влиянии фрикционных свойств измельчаемых материалов на энергетику процессов в помольной камере мельниц. Установлено, что энергетический критерий разрушения зависит, в первую очередь, от физических свойств материалов. Измерением динамических параметров в зоне контакта мелющих тел с измельчаемым материалом без искажения результатов приемным устройством подтверждено, что оптимизация параметров процесса с учетом феномена демпфирования амплитуды ударных импульсов является инструментом снижения энергоемкости дробления и тонкого измельчения пород в мельницах. Теоретические представления о процессах в помольных камерах мельниц подтверждены экспериментально путем измерения параметров шаровой загрузки непосредственно в зоне контакта мелющих тел с материалом.

**Ключевые слова:** минеральное сырье, энергоемкость, дробление и тонкое измельчение, мельница, эксперимент, мелющие тела, фрикционные свойства.

**Для цитирования:** Голик В. И. Исследование влияния свойств твердых тел на энергетику измельчения в мельницах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 10. – С. 112–122. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_10\_0\_112.

### Effect of properties of solids on grinding energy in mills

V.I. Golik

Mining North-Caucasian State Technological University, Vladikavkaz, Russia, e-mail: v.i.golik@mail.ru

---

**Abstract:** The urgency of the issue under discussion is explained by the necessity of enhancement of mining efficiency by means of reducing energy consumption of crushing and fine grinding in mills. This study aims at experimental validation of the theory of crushing and fine grinding of solids in grinding chambers of mills. The milling processes are described using physicochemical phenomena: phase transitions, thermolysis, emission, point defects, dislocations and other factors of the theory of short-lived activity centers. A promising way of solving this problem, including reduction in energy consumption of crushing and fine grinding of solids in different-kind mills in the framework of product preparation, is justified. The main deficiencies of fine grinding of solids in mills are identified. The lab-scale test bench on the ball-tube mill basis is described. The test bench allowed identification of unit impulses, recording of their shapes and their spectral analysis. The experimental validation of the theory of milling with measurement of the ball load parameters in the contact zone of balls and grains is presented with regard to rocks. The ideas on influence of friction properties of mineral grains on the energy of milling in grinding chambers are amended. It is found that the energy criterion of failure depends primarily on the physical properties of materials subjected to milling. The measurement of dynamic parameters in the ball-grain contact zone without receiver-induced impairment of the results proves that optimization of the milling process with regard to the phenomena of damping of the impact amplitude is an efficient tool of reduction of energy consumption in crushing and fine grinding in mills. The theoretical concept of processing in grinding chambers in mills is proved experimentally, by measurements of the ball load parameters immediately in the contact zones of balls and mineral grains.

**Key words:** mineral raw material, energy consumption, crushing and fine grinding, mill, experiment, balls, friction properties.

**For citation:** Golik V. I. Effect of properties of solids on grinding energy in mills. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(10):112-122. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_10\_0\_112.

---

## Введение

Проблемы удовлетворения потребности в металлах при уменьшении запасов месторождений в комфортных для эксплуатации районах и освоении месторождений в суровых районах, ухудшении условий разработки при понижении на глубину становятся все более актуальными и требуют поиска пока еще не используемых резервов улучшения технологических, экономических и экологических показателей горного производства при гуманизации горного производства и охраны экосистем от технологической агрессии [1–4].

Применяемые технологии получают оценку с точки зрения снижения затрат

на производство, где существенную роль играет энергопотребление. Одним из приоритетных направлений решения проблемы снижения энергоемкости является оптимизация способов дробления и тонкого измельчения твердых материалов в мельницах в рамках подготовки к использованию [5–8].

Крупность сырья нередко является основным критерием оптимальности технологий добычи и переработки руд, поэтому аспекты рассматриваемой проблемы находят отражение в исследованиях российских и иностранных специалистов [9–12].

Наиболее эффективным видом механических воздействий является измель-

чение. Оно обладает приоритетом среди таких механических воздействий, как вальцевание, перетираание, перемешивание, создание высокого давления, продавливание сквозь отверстия и др. При использовании вибрационных мельниц, в которых материал не разогревается, происходят пластические деформации, свидетельствующие об аморфизации поверхностных слоев частиц под действием сдвиговых напряжений.

Обогащение и подготовка твердых полезных ископаемых потребляют до 8% производимой в стране электроэнергии, причем большая часть ее расходуется на дробление и измельчение.

На приведение в движение мелющей загрузки мельниц расходуется до 95% подводимой к мельнице энергии. Количество энергии шаровой загрузки для получения заданного гранулометрического состава можно уменьшить, зная параметры отдельных этапов процессов дробления и измельчения.

Значение фактора измельчения актуализируется при освоении прогрессивных технологий, например, выщелачивание металлов из руд, когда крупность минералов становится основным критерием эффективности технологий.

Целью исследования является экспериментальная проверка корректности теории процессов дробления и тонкого измельчения твердых материалов в помольных камерах мельниц, в частности, влияния фрикционных свойств измельчаемых материалов на энергетику процессов измельчения.

### **Методы**

Для оценки и объяснения происходящих при механических реакциях процессов использованы термические, эко-эмиссионные, кинетические, структурные и другие представления.

Для выяснения механизма исследуемых процессов используют теоретиче-

ские положения, суть которых сводится к тому, что тонкое измельчение нарушает состояние поверхности вещества и сопровождается физико-химическими эффектами, в том числе, разорванными химическими связями, механоэмиссионными явлениями, точечными дефектами, дислокациями и другими факторами, описываемыми теорией короткоживущих активных центров.

Задачи исследования решали экспериментально на лабораторном стенде, смоделированном на базе шаровой барабанной мельницы фирмы «Fuller».

Для определения коэффициента трения покоя между слоями шаров в помольной камере использован однокомпонентный радиодинамометр, размещенный в корпусе стандартного мелющего тела — шара.

Для измерения разности между истинным ускорением объекта и гравитационным ускорением применен акселерометр — герметичный блок, включающий чувствительный элемент, усилитель-преобразователь и элементы вывода сигналов. Измерительная аппаратура состояла из автоматического цифрового преобразователя сигналов, компьютера и селективного микровольтметра.

### **Результаты**

После отделения от массива и дробления горная порода получает широкий спектр разновеликих трещин, совокупность которых ослабляет породу вплоть до ее разрушения. Целью исследований является установление параметров энергии, способных вызвать необратимую деформацию твердого материала, в том числе, в аппаратах — измельчителях.

Механизм разрушения связан с взаимодействием трещин в породах и подводимой энергии. Поток импульсов падает под углом к поверхности трещины, которая препятствует его движению и отражается. Падающие и отраженные

импульсы распространяются в породе с продольной скоростью звука в пределах зоны изгибающих напряжений.

Поверхность трещины взаимодействует с падающей и отраженной волнами в интервале времени и отклоняется с поперечной скоростью.

С помощью уравнения Лагранжа, используя длину трещины в качестве обобщенной координаты, определяют соотношения между энергетическими параметрами, обеспечивающими разрушение материала до образования кусков заданного размера. Ударный импульс определяется с учетом характера воздействия мелющих тел на измельчаемый материал с определенными демпфирующими свойствами:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial T}{\partial y} = Q_y,$$

где  $T$  — кинетическая энергия системы;  $y$  — скорость роста трещины;  $Q_y$  — отнесенная к обобщенной координате сила.

Кинетическая энергия отклоненной стенки трещины:

$$T = \int_0^{2\pi y} \int_0^t \frac{\rho a t}{2} \left( \frac{dz}{dt} \right)^2 r - dr - d\phi,$$

где  $\rho$  — плотность материала.

Обобщенная сила  $Q_y$  складывается из обобщенных сил, вызывающих образование новой поверхности, и обобщенной диссипативной силы.

Потенциальная энергия системы:

$$\Pi = \Pi_\sigma - \Pi_p,$$

где  $\Pi_\sigma$  — энергия деформации стенки трещины;  $\Pi_p$  — потенциальная энергия нагружения стенки трещины.

Обобщенная сила образования новой поверхности:

$$Q_y^\gamma = -\frac{\partial \Pi_\gamma}{\partial y} = -\frac{\partial}{\partial y} \left( -2\pi (y^2 - y_0^2) \gamma \right) = 4\pi \gamma y$$

Диссипативная сила с учетом демпфирующих свойств материала:

$$Q_y^{\text{duc}} = -\frac{\partial D}{\partial \dot{y}},$$

где  $D$  — диссипативная функция или функция рассеяния энергии;  $\mu$  — коэффициент демпфирования.

Суммарная обобщенная сила:

$$Q_y = Q_y^{\text{nom}} + Q_y^\gamma + Q_y^{\text{duc}} = \frac{\pi \delta + \sigma y}{6} + 4\pi \gamma y - \mu \dot{y}.$$

Если волна напряжения коротка или мала, роста трещины не произойдет.

Чтобы вызвать разрушение частицы материала, ударный импульс должен обладать определенной энергией.

Энергия ударной волны может быть потрачена на образование новой поверхности, а интенсивность ее воздействия может колебаться в широких пределах. Форма ударных импульсов зависит от свойств пород, мелющих тел и условий воздействия энергии на материал.

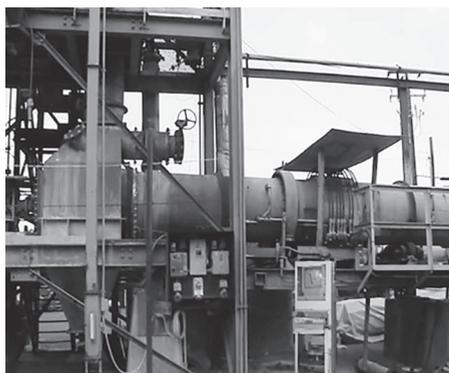
Разрушение осуществится, если удельная энергия ударного импульса будет:

$$\sigma^2 t = \frac{12 \gamma E}{7 a}.$$

Для разрушения необходимо соблюсти условие: в измельчителях процесс соударения мелющих тел с материалом является случайно-периодическим.

Стремятся добиться таких параметров ударного импульса, при которых разрушение частицы материала будет осуществлено с минимальной энергоемкостью.

При уменьшении размеров частиц материала время измельчения возрастает. Мельницы работают в определенных режимах, которые не меняются в течение цикла измельчения. При стабильном приросте площади поверхности материала энергия образования новой поверхности остается постоянной. При уменьшении размера частиц время измельчения уве-



Диаметр помольных камер, м	0,2-2,5
Угловая скорость вращения помольных камер, рад/с	1-10
Длина помольных камер, м	0,3-1,5
Количество помольных камер, шт.	1
Объём помольных камер, л	30-250
Масса медящих тел (шаров), кг	50-800
Диаметр шаров, м	0,05-0,125
Мощность электродвигателя, кВт	12
Масса подвижной части, кг	85-1000
Трёхкомпонентный радиодинамометр (ТРД)	
Диаметр корпуса, м	0,05-0,125
Количество каналов для передачи сигналов, шт.	3
Рабочее напряжение, В	6
Количество элементов питания, шт.	3
Время работы без подзарядки, ч	3
Диапазон воспринимаемых ударных ускорений, g	1-1000
Количество акселерометров, шт.	3
Тип акселерометров	Ёмкости
Тип чувствительных элементов	Маятник
Дальность радиопередачи сигнала, м	15
Количество одновременно используемых ТРД, шт.	1-3
Масса ТРД, кг	0,1-7
Диапазон частот передаваемых сигналов, МГц	60-80
Взаимное расположение акселерометров	Ортогональное
Тип акселерометров	Ёмкости

Вид и параметры испытательного стенда  
View and parameters of test bench

Таблица 1

**Характеристики элементов исследовательского стенда**  
**Testing bench specification**

Показатели	Единицы	Значения
Диаметр шаров	м	0,05 – 0,125
Мощность электродвигателя	кВт	12
Масса подвижной части	кг	85 – 1000
Трёхкомпонентный радиодинамометр	ТРД	
Количество каналов для передачи сигнала	шт.	3
Рабочее напряжение	В	6
Количество элементов питания	шт.	3
Время работы без подзарядки	ч	3
Диапазон воспринимаемых ударных ускорений	g	1 – 1000
Количество акселерометров	шт.	3
Тип акселерометров	маятник	
Дальность радиопередачи сигнала	м	15
Количество одновременно используемых ТРД	шт.	3
Масса трехкомпонентного радиодинамометра	кг	0,1 – 7,0
Диапазон частот передаваемых сигналов	МГц	60 – 80
Взаимное расположение акселерометров	ортогональное	
Тип акселерометров	ёмкостные	

личивается под влиянием демпфирующих свойств материала:

$$a\sigma + b\dot{\sigma} + c\sigma = 0,$$

где  $b$  — коэффициент сопротивления системы.

Коэффициент демпфирования для хрупких материалов зависит от крупности измельчения: чем мельче частицы, тем больше материал демпфирует.

Поэтому измельчать материал в мельницах, использующих принцип ударного разрушения, не рационально, так как большая часть энергии тратится на преодоление демпфирующих свойств.

Под влиянием фрикционных свойств измельчаемого материала и образовавшихся зон трещин энергия ударного импульса и его амплитуда по мере прохождения ударной волны внутрь мелющей загрузки уменьшаются. Важно знать величину амплитуды ударного импуль-

са и величину сообщаемой мелющему телу энергии для измельчения материала до заданного размера.

Такая задача решалась экспериментально на лабораторном стенде, смоделированном на базе шаровой барабанной мельницы фирмы «Fuller», где удалось выделить одиночные импульсы, записать их форму и произвести их спектральный анализ, который подтвердил, что гашение амплитуды ударного импульса происходит (рисунок).

Характеристика элементов исследовательского стенда приведена в табл. 1

Если время взаимодействия ударной волны с материалом окажется достаточно большим, частицы материала за счет демпфирующих свойств погасят амплитуду ударного импульса и сделают его неспособным разрушать материал. Инструментом демпфирующего воздействия на амплитуду ударного импульса

Таблица 2

**Показатели демпфирования амплитуды ударного импульса**  
**Figures of impact amplitude damping**

Размер фракции, мм	Вид материала	Коэффициент демпфирования	Размер фракции, мм	Вид материала	Коэффициент демпфирования
-0,1	гранит	15	-0,1	базальт	12
0,1 – 0,25		9	0,1 – 0,25		9
0,25 – 0,63		6,5	0,25 – 0,63		7
0,63 – 1,25		5	0,63 – 1,25		5
1,25 – 2,5		2	1,25 – 2,5		1,5
-0,1	известняк	20	-0,1	фосфаты	18
0,1 – 0,25		16	0,1 – 0,25		13
0,25 – 0,63		11	0,25 – 0,63		9
0,63 – 1,25		7	0,63 – 1,25		6
1,25 – 2,5		3	1,25 – 2,5		1,5
-0,1	мел	36	-0,1	гипс	30
0,1 – 0,25		29	0,1 – 0,25		24
0,25 – 0,63		21	0,25 – 0,63		19
0,63 – 1,25		16	0,63 – 1,25		12
1,25 – 2,5		5	1,25 – 2,5		3,5

являются возникающие в материале трещины, поглощающие энергию.

Оптимизация параметров процесса с учетом феномена демпфирования амплитуды ударных импульсов становится инструментом снижения энергоемкости измельчения (табл. 2).

Исследование фрикционных свойств соприкасающихся поверхностей позволяет сделать вывод о нелинейной зависимости коэффициента трения от скорости относительного движения поверхности помольной камеры и слоя шаров.

Для определения коэффициента трения покоя между слоями шаров в помольной камере использован одноконтентный радиодинамометр, размещенный в корпусе стандартного мелющего тела — шара. Акселерометр представлял собой герметичный блок, включающий чувствительный элемент, усилитель-преобразователь и элементы вывода сигналов. Наиболее ответственным узлом конструкции акселерометра является чувствительный элемент. Измерительная аппаратура состояла из автоматического цифрового преобразователя сигналов, компьютера и селективного микровольтметра.

При движении барабана шары верхнего слоя давили на нижние шары, что изменяло расстояние между пластина-

ми емкостных акселерометров и частоту сигнала.

Для определения параметра трения покоя между слоями шаров в помольной камере измеряли угол поворота  $\varphi$  мельницы в момент проскальзывания слоя относительно поверхности помольной камеры. Значение коэффициента  $f$  определяли при допущении, что сила трения покоя по модулю равна максимальной силе, необходимой для начала движения тела:

$$f = tg\varphi$$

В качестве исследуемого материала использовали известняковый и гранитный щебень, фосфоритная и известняковая мука, древесный уголь, а также отсева горных пород. Пробы отбирались с повышенным содержанием крупных фракций и мелких фракций (табл. 3).

Установлено, что увеличение доли крупных и мелких фракций повышает коэффициент трения, причем крупные фракции на увеличение коэффициента трения влияют сильнее, что можно объяснить усилением шероховатости поверхности контакта.

При прочих равных условиях коэффициент трения от взаимодействия слоя шаров с поверхностью помольной камеры ниже его значений при взаимодействии между слоями.

Таблица 3

**Содержание фракций в пробах материалов**  
**Fraction content of samples**

Размер фракции, мм	Содержание фракций в пробах, %					
	1	2	3	4	5	6
10–20	50	40	30	20	10	1
5–10	25	15	10	8	5	3
2,5–5	12	10	8	7	8	9
1–2,5	9	15	20	22	17	12
0,5–1	3	10	12	13	20	25
–0,5	1	10	20	30	40	50
Всего, %	100	100	100	100	100	100

Полученные закономерности иллюстрируют фрикционные свойства мелющей загрузки при вращении помольной камеры с угловой скоростью менее 0,5 рад/с.

Коэффициент трения и скорости шага взаимосвязаны:

$$\mu = f(\omega R - \dot{\phi}(R - r)).$$

Кинетическая характеристика трения определяется величиной скорости проскальзывания в момент отрыва от мелющей загрузки, которая измеряется косвенно вследствие невозможности прямого измерения.

Шар, оторвавшись от других шаров или поверхности камеры, не сразу сцепляется с ним вновь, а успевает еще несколько раз совершить движения с уменьшающейся скоростью проскальзывания.

Для материалов с пониженным коэффициентом внутреннего трения проскальзывание сильнее в расположенных ближе к поверхности помольной камеры, чем у материалов с большим коэффициентом. Скорости проскальзывания по сравнению со скоростью проскальзывания всего слоя не велики.

Эксперимент позволил дать количественную и качественную оценку процесса проскальзывания отдельно взятых элементов мелющей загрузки. Направления векторов скоростей относительного проскальзывания шаров в зонах у поверхности мелющей загрузки и в ближайших к центру помольной камеры слоях противоположны. Это позволяет сделать вывод о том, что влияние проскальзывания отдельных мельющих тел на характер движения мелющей загрузки в целом весьма незначительно. В то же время проскальзывание отдельных шаров способствует перемешиванию и измельчению материала путем раздавливания, что важно для мелких частиц, которые не доступны измельчению ударом.

Преобладание средних фракций улучшает условия перемещения шаров. Наименьшая скорость скольжения характерна для крупных фракций из-за увеличения внутреннего трения.

Снижение скорости скольжения при преобладании мелких фракций можно объяснить проявлением адгезионных свойств, причем твердые материалы характеризуются большим коэффициентом внутреннего трения, а мягкие материалы снижают значения фрикционных характеристик загрузки.

Материалы с низкой твердостью выступают в роли смазки между шарами и их слоями, поэтому при прочих равных условиях значения скорости их проскальзывания тем выше, чем меньше значения твердости и абразивности.

Полученные результаты хорошо согласуются с результатами комплексных исследований по тематике горного производства в России и за рубежом [13–17].

Аспекты рассматриваемой проблемы находят свое отражение при решении вопросов совершенствования смежных процессов промышленного производства [18–20].

## Выводы

Теоретические исследования процессов в помольных камерах мельниц проверяются экспериментально с изменением параметров шаровой загрузки непосредственно в зоне контакта мельющих тел с материалом.

Исследование фрикционных свойств измельчаемых материалов указывают на нелинейную зависимость коэффициента трения от скорости относительного движения поверхности помольной камеры и слоя шаров, что важно для управления энергетикой процессов измельчения.

Математическим моделированием установлено, что энергетический критерий разрушения зависит только от

физических свойств материалов. Изменением динамических параметров в зоне контакта мелющих тел с измельчаемым материалом без искажения поз-

воляет экспериментально подтвердить установленный теоретически энергетический критерий разрушения материалов в мельнице.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дребенштедт К., Голик В. И., Дмитрак Ю. В. Перспективы диверсификации технологии добычи металлов в РСО-Алания // Устойчивое развитие горных территорий. — 2018. — Т. 10. — № 1 (35). — С. 125–131.
2. Espinoza R. D., Rojo J. Towards sustainable mining (Part I): Valuing investment opportunities in the mining sector // Resources Policy. 2017, vol. 52, pp. 7–18.
3. Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В., Радченко Д. Н. Расширение сырьевой базы горнорудных предприятий на основе комплексного использования минеральных ресурсов месторождений // Горный журнал. — 2013. — № 12. — С. 29–33.
4. Tayebi-Khorami M., Edraki M., Corder G., Golev A. Re-thinking mining waste through an integrative approach led by circular economy aspirations // Minerals. 2019, vol. 9, pp. 1–13. DOI: 10.3390/min9050286.
5. Дмитрак Ю. В. Теория движения мелющей загрузки и повышение эффективности оборудования для тонкого измельчения горных пород; автореферат дисс. доктора технических наук. — М.: МГГУ, 2000. — 44 с.
6. Заалишвили В. Б., Сатцаев А. М., Болатова М. А., Еналдиев А. Ф. Ресурсосберегающие технологии переработки хвостов обогащения и металлургии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2004. — № 2. — С. 318–320.
7. Дзапаров В. Х., Харебов Г. З., Стась В. П., Стась П. П. Исследование сухих строительных смесей на основе отходов производства для подземного строительства // Сухие строительные смеси. — 2020. — № 1. — С. 35–38.
8. Габараев О. З., Дмитрак Ю. В., Дребенштедт К., Савелков В. И. Закономерности взаимодействия разрушенных геоматериалов и рудовмещающего массива при отработке подработанных вкрапленных руд // Устойчивое развитие горных территорий. — 2017. — Т. 9. — № 4 (34). — С. 406–413.
9. Ben-Awuah E., Richter O., Elkington T., Pourrahimian Y. Strategic mining options optimization: Open pit mining, underground mining or both // International Journal of Mining Science and Technology. 2016, vol. 26, no. 6, pp. 1065–1071.
10. Богданов В. С., Воробьев Н. Д., Кинематика шаровой загрузки в барабанных мельницах с наклонными межкамерными перегородками // Известия вузов. Горный журнал. — 1985. — № 1. — С. 84–96.
11. Петров В. А., Андреев Е. Е., Биленко Л. Ф. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. — М.: Недра, 1990. — 301 с.
12. Сыса А. Б. О выборе рациональных направлений развития измельчительного оборудования // Известия вузов. Цветная металлургия. — 1994. — № 3. — С. 67–75.
13. Грязев М. В., Качурин Н. М., Захаров Е. И. Тульский государственный университет: 85 лет на службе отечеству // Горный журнал. — 2016. — № 2. — С. 25–29.
14. Vrancken C., Longhurst P. J., Wagland S. T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production // Waste Management. 2018, vol. 61, pp. 40–57.
15. Дмитрак Ю. В., Шишканов К. А. Разработка вероятностной кинематической модели мелющих тел в помольной камере вибрационной мельницы // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2010. — № 12. — С. 302–308.

16. Cardu M., Seccatore J., Vaudagna A., Rezende A., Galvao F., Bettencourt J. S., de Tomi G. Evidences of the influence of the detonation sequence in rock fragmentation by blasting. Part I // REM: Revista Escola de Minas. 2015, vol. 68, no. 3, pp. 337–342. DOI: 10.1590/0370-44672014680218.

17. Емельяненко Е. А., Радченко Д. Н., Лавенков В. С., Гавриленко В. В. Совместная утилизация отходов обогащения при комплексном освоении месторождений многокомпонентных руд // Горный журнал. — 2016. — № 12. — С. 87–93.

18. Комащенко В. И. Разработка взрывной технологии, снижающей вредное воздействие на окружающую среду // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2016. — № 1. — С. 34–43.

19. Ляшенко В. И., Андреев Б. Н. Повышение эффективности буровзрывной подготовки рудной массы к подземному блочному выщелачиванию // Безопасность труда в промышленности. — 2019. — № 8. — С. 27–35.

20. Ключев Р. В., Босиков И. И., Майер А. В., Гаврина О. А. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы // Устойчивое развитие горных территорий. — 2020. — Т. 12. — № 2(44). — С. 283–290. **УВАЭ**

## REFERENCES

1. Drebenstedt K., Golik V. I., Dmitrak Yu.V. Prospects for diversification of metal mining technology in North Ossetia-Alania. *Ustoychivoe razvitie gornykh territoriy*. 2018, vol. 10, no. 1 (35), pp. 125–131. [In Russ].

2. Espinoza R. D., Rojo J. Towards sustainable mining (Part I): Valuing investment opportunities in the mining sector. *Resources Policy*. 2017, vol. 52, pp. 7–18.

3. Kaplunov D. R., Rylnikova M. V., Radchenko D. N. Expansion of the raw material base of mining enterprises based on the integrated use of mineral resources of deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2013, no. 12, pp. 29–33. [In Russ].

4. Tayebi-Khorami M., Edraki M., Corder G., Golev A. Re-thinking mining waste through an integrative approach led by circular economy aspirations. *Minerals*. 2019, vol. 9, pp. 1–13. DOI: 10.3390/min9050286.

5. Dmitrak Yu. V. *Teoriya dvizheniya melyushchey zagruzki i povyshenie effektivnosti obrudovaniya dlya tonkogo izmel'cheniya gornykh porod* [The theory of grinding loading motion and increasing the efficiency of equipment for fine grinding of rocks. abstract of thesis], Doctor's thesis, Moscow, MGGU, 2000, 44 p.

6. Zaalishvili V. B., Sattsaev A. M., Bolatova M. A., Enalдиеv A. F. Resource-saving technologies for processing tailings of concentration and metallurgy. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2004, no. 2, pp. 318–320. [In Russ].

7. Dzaparov V.Kh., Kharebov G. Z., Stas V. P., Stas P. P. Research of dry building mixtures based on industrial waste for underground construction. *Sukhie stroitel'nye smesi*. 2020, no. 1, pp. 35–38. [In Russ].

8. Gabaraev O. Z., Dmitrak Yu.V., Drebenstedt K., Savelkov V. I. Regularities of interaction of destroyed geomaterials and ore-bearing massif during mining of underworked disseminated ores. *Ustoychivoe razvitie gornykh territoriy*. 2017, vol. 9, no. 4 (34), pp. 406–413. [In Russ].

9. Ben-Awuah E., Richter O., Elkington T., Pourrahimian Y. Strategic mining options optimization: Open pit mining, underground mining or both. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2016, vol. 26, no. 6, pp. 1065–1071.

10. Bogdanov V. S., Vorobyov N. D. Kinematics of ball loading in drum mills with inclined interchamber partitions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*. 1985, no. 1, pp. 84–96. [In Russ].

11. Petrov V. A., Andreev E. E., Bilenko L. F. *Droblenie, izmel'chenie i grokhochenie po- leznykh iskopaemykh* [Crushing, crushing and screening of minerals], Moscow, Nedra, 1990, 301 p.

12. Syta A. B. On the choice of rational directions for the development of grinding equip- ment. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 1994, no. 3, pp. 67 – 75. [In Russ].

13. Gryazev M. V., Kachurin N. M., Zakharov E. I. Tula state university: 85 years in the ser- vice of the fatherland. *Gornyi Zhurnal*. 2016, no. 2, pp. 25 – 29. [In Russ].

14. Vrancken C., Longhurst P. J., Wagland S. T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production. *Waste Management*. 2018, vol. 61, pp. 40 – 57.

15. Dmitrak Yu.V., Shishkanov K. A. Development of a probabilistic kinematic model of grinding bodies in the grinding chamber of a vibration mill. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2010, no. 12, pp. 302 – 308. [In Russ].

16. Cardu M., Seccatore J., Vaudagna A., Rezende A., Galvao F., Bettencourt J. S., de Tomi G. Evidences of the influence of the detonation sequence in rock fragmentation by blasting. Part I. *REM: Revista Escola de Minas*. 2015, vol. 68, no. 3, pp. 337–342. DOI: 10.1590/0370-44672014680218.

17. Emelianenko E. A., Radchenko D. N., Lavenkov V. S., Gavrilenko V. V. Joint utiliza- tion of beneficiation wastes during the integrated development of multi-component ore deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2016, no. 12, pp. 87 – 93. [In Russ].

18. Komashchenko V. I. Development of an explosive technology that reduces harmful ef- fects on the environment. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta, Nauki o zemle*. 2016, no. 1, pp. 34 – 43. [In Russ].

19. Lyashenko V. I., Andreev B. N. Increasing the efficiency of drilling and blasting prepara- tion of ore mass for underground block leaching. *Occupational Safety in Industry*. 2019, no. 8, pp. 27 – 35. [In Russ].

20. Klyuev R. V., Bosikov I. I., Mayer A. V., Gavrina O. A. Comprehensive analysis of the use of effective technologies to improve the sustainable development of the natural and tech- nical system. *Ustoychivoe razvitie gornykh territoriy*. 2020, vol. 12, no. 2(44), pp. 283 – 290. [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Голик Владимир Иванович – д-р техн. наук,  
профессор, e-mail: v.i.golik@mail.ru,  
Северо-Кавказский государственный  
технологический университет.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.I. Golik, Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
e-mail: v.i.golik@mail.ru,  
Mining North-Caucasian State Technological University,  
362021, Vladikavkaz, Russia.

Получена редакцией 02.02.2021; получена после рецензии 28.06.2021; принята к печати 10.09.2021.  
Received by the editors 02.02.2021; received after the review 28.06.2021; accepted for printing 10.09.2021.

