ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья
УДК 622.7.051:622.73

Научно-экспериментальные основы сухого обогащения руд полезных ископаемых

А.И.МАТВЕЕВ ✉, И.Ф.ЛЕБЕДЕВ, В.Р.ВИНОКУРОВ, Е.С.ЛЬВОВ
Институт горного дела Севера им. Н.В.Черского СО РАН, Якутск, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Матвеев А.И., Лебедев И.Ф., Винокуров В.Р., Львов Е.С. Научно-экспериментальные основы сухого обогащения руд полезных ископаемых // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 613-622. DOI: 10.31897/PMI.2022.90

Аннотация. Приведены результаты исследований по созданию технологий и оборудования в области рудоподготовки и пневматического сухого обогащения руд полезных ископаемых. Рассмотрены способы дробления и измельчения перед обогащением полезных ископаемых, исследовано сухое обогащение геоматериалов. Разработаны и апробированы высокоэффективные опытные образцы горно-обогатительного оборудования: дробилки многократного динамического воздействия РД-МДВ-900, ДКД-300, центробежные измельчители ЦМВУ-800 и ВЦИ-12, пневмосепаратор ПОС-2000. Созданы принципиальные конструкции и проектируется ряд новых аппаратов рудоподготовки и пневматического обогащения. Показана эффективность апробации автономного комплекса сухого обогащения с новыми безопасными стандартами экологии по переработке золотосодержащих руд, позволяющих полностью раскрыть и извлечь свободное золото крупностью от 10000 до 100 мкм. Внедрение сухого метода обогащения для горнодобывающей промышленности является весьма перспективным, позволит снизить капитальные затраты на строительство стационарных обогатительных фабрик, полностью или частично отказаться от применения технологической воды, строительства системы водоснабжения, традиционного хвостохранилища и т.д.

***Ключевые слова*:** дробилка; измельчитель; пневмосепаратор; сухое обогащение; полезные ископаемые; геоматериалы, эффективность

Благодарность. Лабораторная часть исследований продуктов обработки проводилась на оборудовании ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант №13.ЦКП.21.0016).

Поступила: 17.06.2022 ***Принята: 18.10.2022*** ***Онлайн: 03.11.2022*** ***Опубликована: 03.11.2022***

Введение. В настоящее время в обогатительном комплексе горнодобывающей промышленности возрастает интерес к использованию сухих технологий обогащения минерального сырья, представляющих собой перспективное направление. Известно, что некоторые разработки сухих технологий и оборудований нашли применение в различных отраслях производства [1, 2], в том числе в области магнитной сепарации железосодержащих руд [3-5]. В обогащении минерального сырья это прежде всего отсутствие необходимости использования технологической воды, фильтрации, сгущения и высушивания продуктов обогащения, что приводит к экономии финансовых средств и энергозатрат [6, 7]. Актуальность изучаемого направления связана с высоким расходом технической воды в процессах обогащения полезных ископаемых, что в условиях российского Севера чревато высокой себестоимостью и повышенной экологической нагрузкой на окружающую среду и подтверждается опытом эксплуатации обогатительных фабрик на территории Якутии.

Цель статьи – обзор вопросов разработки технологии сухого обогащения, связаных с опытно-конструкторскими исследованиями в области рудоподготовки и пневматического сухого обогащения руд полезных ископаемых, в том числе на основе авторских изысканий.

Основная проблема рудоподготовки заключается в дороговизне и неэффективности процессов раскрытия минералов полезных ископаемых, а мокрого обогащения – в высоком расходе технической воды (4-5 м^3/т и более). Исследования в области рудоподготовки выявили, что ударный

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© А.И.Матвеев, И.Ф.Лебедев, В.Р.Винокуров, Е.С.Львов, 2022

(динамический) способ разрушения является наиболее рациональным для предварительной подготовки материала перед обогащением и имеет ряд преимуществ по степени дробления, энергоемкости, а главное, по раскрытию полезных компонентов. При этом основная цель не только сокращение крупности дробимого материала, но и максимально возможное раскрытие полезного компонента от рудной массы, происходящее в основном режиме дезинтеграции по наиболее слабым интергранулярным и межминеральным связям сложных по текстуре рудных полиминеральных естественных комплексов (агрегатов) [8-10]. Это явление в технической литературе определено как избирательное раскрытие тех или иных минеральных компонентов вследствие селективного характера разрушения сложных по составу и текстуре горных пород.

Изучению процессов разрушения горных пород, основ конструирования дробильно-измельчительного оборудования посвятили работы ученые: П.В.Ритгингер, В.А.Масленников, В.А.Кирпичев, Ю.А.Муйземнек, Ф.Бонд, Ф.Кик, А.К.Рундквист, Р.А.Родин, Л.А.Вайсберг, М.М.Протодьяконов, Л.И.Барон, Л.Ф.Биленко, П.М.Сиденко, П.А.Ребиндер и др. Совершенствованием и разработкой оборудования ударного измельчения занимались В.А.Бауман, Э.И.Левданский, Б.В.Клушанцев. Огромный вклад в области разрушения горных пород внес В.И.Ревнивцев. Он разработал и всесторонне обосновал концепцию селективной дезинтеграции руд и понятия геометрической и энергетической селективности дезинтеграции горных пород, что фактически означает разрушение по поверхностям раздела фаз при минимальных энергозатратах. Ревнивцев исследовал основные принципы рациональной организации раскрытия минеральных сростков при подготовке рудного сырья к обогащению, согласно которым для эффективного разрушения материала необходимо приложение многократных дозированных по величине нагрузок и применение различных методов разупрочнения руд, снижающих прочность контакта разноименных компонентов и облегчающих селективное раскрытие сростков. Создание таких условий возможно в ударных центробежных мельницах при условии, что их конструкция будет обеспечивать многократные динамические воздействия на измельчаемый материал.

В области измельчения оборудование с ударным принципом работы характеризуется относительно низкими удельными энергетическими затратами [11, 12]. Эффективность измельчения зависит от конкретного способа механического воздействия и конструктивных особенностей мельницы [13-15]. За рубежом [16, 17] (Metso Outotec, Acrowood Corp., Metso Minerals) и в РФ (ЗАО «Новые технологии», НПО «Центр», завод «ТЕХПРИБОР») ведутся активные разработки центробежных установок, основанных на ударном разрушении геоматериалов [18, 19]. Наиболее распространенные серийные центробежные ударные установки представлены в табл.1.

Таблица 1

Технические характеристики центробежных установок

Параметры	Трибокинетика 3050	Титан М-63	Титан М-125	Barmac B3100SE VSI
Производительность, т/ч	1-4,5	1-3	3-10	5-9
Крупность питания, мм	до 20	до 30	до 40	до 20
Крупность измельченного продукта, мм	0,063-1,25 0,01-0,063	0,04-0,3	0,05-0,5	0,01-2
Установленная мощность, кВт	60,2	110	205	11
Габаритные размеры, м	5,8×5,4×3,8	5,5×3,0×7,6	7,6×4,2×15,3	1,3×0,9×1,2
Масса, т	3,9	8	12	1,2

Даже самое современное измельчительное оборудование при переходе на глубокое измельчение геоматериалов все равно остается достаточно энергозатратным, особенно там, где стоит задача валового измельчения или сокращения крупности. Часто для измельчения более крепких частиц пустой породы (например, кварца) расходуется большая энергия, уровень которой существенно возрастает при переходе на стадии тонкого измельчения.

Методология исследований. Найдены условия существенной интенсификации процессов ударного дробления и измельчения, которые заключаются в возможности обеспечения многократных динамических воздействий на кусковые геоматериалы в рабочей зоне разрушения, реализуемые в новых аппаратах, где обусловлена мгновенная объемная передача напряжений по механическим

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

связям по всему объему материала, что в конечном счете приводит к его фатальному разрушению в режиме дезинтеграции с опережающим избирательным раскрытием минеральных форм, в том числе полезных компонентов [20, 21]. Эффект полностью соответствует золотому правилу обогатителей: «Не дробить ничего лишнего».

В статье применен комплексный метод исследований: анализ и обобщение литературных и патентных источников, экспериментальные лабораторные исследования процессов сухой дезинтеграции горных пород в разрабатываемых мельницах многократного динамического воздействия (дробилка ДКД-300, измельчитель ЦМВУ-800), опытно-промышленные испытания, стандартные и нестандартные методики определения технологических свойств исходных геоматериалов (крепость по методике Протодьяконова) и продуктов переработки обогащения кварц-жильных золотосодержащих руд месторождений – Нежданинское, Дуэт, Сарылах, Малтан, Нагорное, Якутское, Вьюн, Мало-Тарынское (Якутия), Гурбей (Иркутская обл.), гранулометрический и фракционный методы анализа продуктов дробления, измельчения, пневмосепарации (виброгрохот лабораторный Гр-50, мельница вибрационного типа ЧМВ-1), методы планирования экспериментов, статистическая и аналитическая обработки результатов экспериментальных исследований (дифрактометр D8 Discover Bruker, спектрометр SRS-3400 Bruker). Также была разработана методика определения степени дезинтеграции, которая позволяет анализировать процессы рудоподготовки (дезинтеграция, механическое разрушение) при определении гранулометрического состава дробленого продукта с характерными модальными признаками. Методика базируется на вычленении из общего гранулометрического состава продуктов дробления доли области их преимущественного накопления (моды), описываемой в виде логнормального распределения, зависящего от энергии механического воздействия и отвечающего за процесс непосредственного механического разрушения геоматериала. Степень дезинтеграции определяется долей материала, выделенного дезинтеграцией (самопроизвольной диспергацией) в процессе дробления и измельчения, которая формируется вычитанием из общей суммы распределения гранулометрического состава доли разрушаемого геоматериала (в %) непосредственно механическим разрушением.

Обсуждение. По проведенным исследованиям установлены закономерности дезинтеграции горных пород при интенсивных механических воздействиях, разработаны способы разрушения кусковых геоматериалов многократными динамическими воздействиями в режиме дезинтеграции, избирательного опережающего раскрытия мономинеральных полезных компонентов, что послужило для разработки ряда перспективных аппаратов рудоподготовки: сухого дробления и измельчения. В этой части защищено наибольшее количество патентов РФ (34 шт.).

Характерный эффект получен при испытании различных рудных геоматериалов в дробилке комбинированного ударного действия ДКД-300. Процесс разрушения кусковых рудных материалов в этой дробилке происходит благодаря многократным динамическим воздействиям, образованным не только действием рабочих органов, но также и взаимодействием (столкновением) кусков друг с другом. Испытания этого аппарата при дроблении алмазосодержащих кимберлитов трубки «Зарница» в сравнении с результатами дробления роторной дробилки Nordberg NP-1007, испытанной в аналогичных условиях, показали, что степень дробления в дробилке многократного ударного действия ДКД-300 при четырех показателях производительности выше (табл.2).

Наряду с высокой степенью дробления получены данные по высокой сохранности кристаллов алмазов по сравнению с мокрой мельницей самоизмельчения типа «Каскад» в три раза [22]. Эти результаты позволяют сделать вывод о возможности применения дробилки ДКД-300 при дроблении кимберлитовых руд. В настоящее время разработана высокопроизводительная роторная дробилка РД-МДВ-900 (рис.1), использующая такой же принцип дробления многократными динамическими воздействиями, отличающаяся от дробилки ДКД-300 не только большей производительностью до 120 т/ч, но и наличием в конструкции калибровочной колосниковой решетки, благодаря которой возможно не только своевременно выводить мелкие фракции без их переизмельчения, но и контролировать верхний класс крупности дробленого материала, что несомненно является важной функцией, исключающей образование в технологических схемах рудоподготовки накопления критических классов крупности и необходимость формирования циркулирующих нагрузок или межцикловой стадии дробления. Применение высокопроизводительной дробилки многократного

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 613-622 DOI: 10.31897/PMI.2022.90
© А.И.Матвеев, И.Ф.Лебедев, В.Р.Винокуров, Е.С.Львов, 2022

динамического воздействия РД-МДВ-900 позволит сократить затраты по металлоемкости и энергоэффективности в сравнении с мельницами самоизмельчения на предприятиях переработки алмазосодержащих кимберлитовых руд. Полная реализация данной дробилки в схемах рудоподготовки алмазообогатительных фабрик позволит исключить мокрую часть распульповки, следовательно отпадает необходимость размещения процессов рудоподготовки в корпусах с отапливаемым контуром, а это, в свою очередь, в суровых условиях Севера является существенным фактором снижения себестоимости переработки и в целом обогащения кимберлитовых руд.

Таблица 2

Гранулометрические составы продуктов дробления кимберлитовых руд трубки «Зарница»

Класс крупности, мм	Выход, %			
	NP-1007	ДКД-300		
	Производительность, т/ч			
	89	5,8	12,2	15,2
−1,6+0	7,9	28	21,3	18,90
−5+1,6	25	38	33	30,00
−10+5	21	18,7	21,5	22,70
−20+10	35	13	20,5	23,50
−35+20	9,9	2,2	3,7	4,50
−50+30	1,2	0,1	–	0,40
Степень дробления	3,3	6,8	5,3	4,8

Повышенный эффект избирательного раскрытия полезных компонентов руды при многократных ударных воздействиях доказан при переработке золотосодержащих руд. Испытания дробилки ДКД-300 позволили оценить уровень раскрытия свободного золота для ряда золотосодержащих руд различных месторождений.

Характерны результаты испытаний золотосодержащей руды месторождения Гурбей Иркутской обл. в рамках тестирования технологии сухого обогащения. При дезинтеграции золотосодержащей сланцевой руды биотит-кварцевого состава в дробилке ДКД-300, использующей принцип многократного ударного воздействия, раскрывается до 47 % гравитационно-извлекаемого золота крупностью более 100 мкм за одну стадию дробления. Степень раскрытия золота подтверждается проведенными инструментальными исследованиями с использованием электронного микроскопа ТЕСКАН системой анализа TIMA [23]. Последующее извлечение раскрытого золота связано с получением «золотой головки».

Для более точного количественного определения эффекта дезинтеграции обоснована методика определения степени дезинтеграции геоматериалов [24]. Методика позволяет разделить два одновременно происходящих в рудоподготовке процесса – собственно механическое разрушение кусковых рудных геоматериалов и сопутствующий ему процесс дезинтеграции, т.е. раскрытие более слабых механических связей, обусловленных текстурными особенностями рудных природных образцов. Графически методика расчета степени дезинтеграции представлена на рис.2, где гранулометрическая характеристика продуктов дробления золотосодержащих руд золотокварцевого типа, как правило, имеет условно две характерные моды – одна в области мелких классов и вторая – крупных. Мода в области более крупных фракций имеет форму логнормального распределения, а заштрихованная часть представляет долю материала, разрушенного вследствие дезинтеграции, т.е. самопроизвольной диспергации наиболее слабой



Рис.1. Общий вид дробилки РД-МДВ-900

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.90

Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 613-622
© А.И.Матвеев, И.Ф.Лебедев, В.Р.Винокуров, Е.С.Львов, 2022

части геоматериала, зависящий от текстурных особенностей. Таким образом, соотношение заштрихованной площади к общей массе дробленого материала представляет степень дезинтеграции, а расчет степени дезинтеграции основан на определении доли продуктов в результате механического воздействия и вычленении из общего гранулометрического состава продуктов дробления.

Расчетная часть методики выглядит следующим образом. Выявляются параметры области моды в области крупных фракций, ограниченных $\lg d_1$ и $\lg d_2$, и значение выхода γ_{max}. Определяется площадь

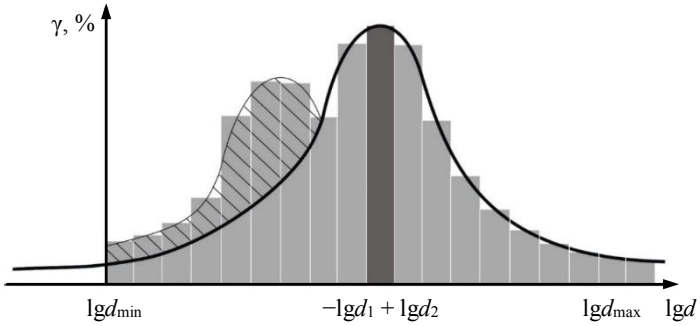


Рис.2. Методика определения степени дезинтеграции

$$S_0 = \int_{\lg d_1}^{\lg d_2} f(x) d_x.$$

Из условия $S^{\text{I}} = f(x)$, приравненной к функции логарифмически-нормального распределения,

$$e^{-\frac{\lg(x-a)^2}{2\delta^2}} = f(x),$$

$$e^{-\frac{\left(x-\frac{d_1+d_2}{2}\right)}{2\delta^2}} = f(x).$$

Определяется значение δ, затем вычисляется площадь под функцией логарифмически-нормального распределения

$$S = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} \int_{n_i}^{N_i} e^{-\frac{\lg(x-a)^2}{2\delta^2}} dx.$$

Степень дезинтеграции

$$D = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} \int_{n_i}^{N_i} e^{-\frac{\lg(x-a)^2}{2\delta^2}} dx.$$

В табл.3 представлены результаты расчетов степени дезинтеграции руд различных текстур с применением ударного способа дробления, осуществляемого в аппарате ДКД-300. Степень дезинтеграции зависит не только от текстуры и минерального состава геоматериала, но и от интенсивности дробления. Предложенная методика определения степени дезинтеграции кусковых геоматериалов в процессе дробления с использованием динамических воздействий действительно может дать количественную характеристику процесса дезинтеграции, как составного процесса рудоподготовки дроблением и измельчением. А степень дезинтеграции может быть важной технологической характеристикой как объекта рудоподготовки минерального сырья, так и аппарата дробления и измельчения независимо от используемого способа и типоразмера.

Таблица 3

Степень дезинтеграции руд различных текстур в дробилке ДКД-300

Руда	Производительность, т/ч	Степень дезинтеграции
Кварц-антимонитовая полосчатой текстуры	6	0,49
Антимонитовая с прожилками кварца	6	0,68
Кварц-антимонитовая прожилковой текстуры	6	0,56
Кварцевая массивной текстуры	6	0,35
Биотит-кварцевая сланцевой текстуры	6	0,52

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© А.И.Матвеев, И.Ф.Лебедев, В.Р.Винокуров, Е.С.Львов, 2022

Окончание табл.3

Руда	Производительность, т/ч	Степень дезинтеграции
Базальтовая массивной текстуры	6	0,43
Кимберлитовая	5,8	0,85
	12,2	0,74
	15,2	0,71

Разработан способ измельчения многократными динамическими воздействиями с возможностью нарастания энергии воздействия (скорости столкновения частиц друг с другом и с поверхностью рабочих органов). Для реализации данного способа созданы измельчители многократного динамического воздействия с оригинальными конструктивными решениями, в частности центробежные мельницы ударного действия с разной конструктивной формой рабочих органов (ступенчатой, конусной, дисковой).

Такой первой разработкой является центробежная ступенчатая мельница ЦМВУ-800, которая была спроектирована, изготовлена и испытана. Общий вид полупромышленного варианта центробежной ступенчатой мельницы ЦМВУ-800 представлен на рис.3. Техническая характеристика: производительность – до 6 т/ч; мощность – 7 кВт; крупность питания – до 20 мм; крупность продукта – 0,05-1 мм; габаритные размеры – 1,4×1,3×1,2 м; масса – 0,9 т.

При ступенчатой форме рабочих органов измельчаемые частицы на каждой ступени получают возрастание скорости по мере перемещения их в рабочей камере мельницы к периферийной разгрузке, за счет чего повышается эффективность измельчения, степень измельчения составляет до 21 %.

Одна из последних разработок, основанная на способе измельчения многократными динамическими воздействиями, – вертикальный центробежный измельчитель повышенной производительности ВЦИ-12 [25] до 12 т/ч. Техническая характеристика: производительность – до 12 т/ч; мощность – 30 кВт; крупность питания – до 30 мм; диаметр внутреннего диска – 1200 мм; размеры приемного отверстия – 280×160 мм; размеры выпускного лотка – 210×220 мм; число оборотов внутреннего диска – 760 об/мин; масса – 6662,5 кг; масса без электродвигателя – 6512,5 кг.



Рис.3. Общий вид мельницы ЦМВУ-800

В отличие от известных измельчителей ударного и истирающего действия, в предлагаемом центробежном вертикальном измельчителе ВЦИ-12 существует дополнительная возможность управления процессом измельчения за счет регулировки угла разгрузки измельченного материала и рационального зазора между рабочими органами (дисками), при которых исключается выброс недоизмельченных частиц из рабочей зоны измельчителя с возможностью получения контролируемой крупности помола продуктов дезинтеграции.

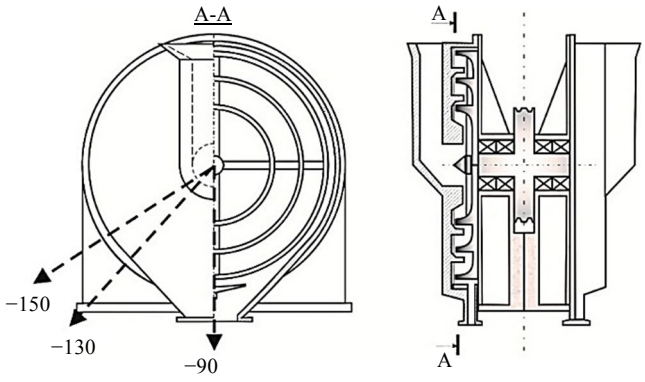


Рис.4. Конструкция центробежного вертикального измельчителя с возможностью регулировки угла разгрузки

На рис.4 представлена возможность регулирования высоты узла разгрузки под определенным углом относительно центральной оси корпуса и оси вращения рабочих органов измельчителя.

Предварительно проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность управления процессом измельчения предложенным способом. На основании полученных результатов установлено, что при угле

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

разгрузки −150 ° гранулометрический состав продуктов измельчения наиболее равномерный с наибольшим содержанием мелких классов. Это объясняется тем, что именно при таком наиболее рациональном значении угла разгрузки происходит вынос наиболее мелких и легких фракций из зоны измельчения.

В горной промышленности как в России, так и за рубежом разрабатываются новые технологии и оборудование для сухих методов переработки и обогащения полезных ископаемых, что несомненно является перспективным направлением. Разработка и применение пневмосепарации расширяет диапазон методов сухого обогащения минерального сырья [26-28]. Широко применяются классифицирующие измельчительные комплексы, использующие воздушную сепарацию для разделения однокомпонентных минералов по крупности при измельчении их для производства строительных смесей [29, 30]. Применяя воздушную сепарацию для разделения по разности плотностей, хороших результатов по пневматической сепарации добились исследователи ООО «Промобогащение» при создании установки «СЕПАИР». В ней использован принцип разделения по отличающейся плотности минералов в восходящем потоке воздуха, создаваемом в сопле установки над движущейся перфорированной лентой, на которой находятся разделяемые минералы [31-33].

В части сухого обогащения разработаны основы разделения минералов из измельченного материала по миграционной способности в искусственно создаваемом минерально-воздушном потоке, что является существенным развитием в области пневматических методов обогащения, а конкретно для обогащения минералов высокой и средней плотности минеральных смесей в искусственно создаваемых аэродинамических потоках. Развитие теоретических и экспериментальных исследований позволило разработать пневматический винтовой сепаратор, предназначенный в основном для доводочных операций обогащения минералов высокой и средней плотности (золото, платина, алмазы, циркон, ильменит и др.). В винтовом пневматическом сепараторе организовано противонаправленное движение удаляемых пустых материалов (хвостов) и движущихся в накопитель тяжелых минералов. За счет этого сводится к минимуму столкновение противоположно направленных песчинок легких минералов с минералами высокой плотности, что позволяет достичь высокой степени извлечения и сократить исходный материал [34, 35].

Результаты исследований извлечения тяжелых минералов представлены на рис.5. Наиболее высокое извлечение 89,5 % и сокращение в 17 раз при влажности 2 % достигнуто при скорости воздушного потока 10 м/с.

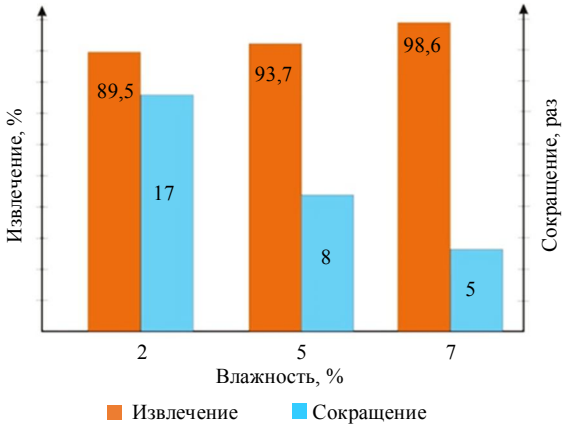


Рис.5. Гистограмма извлечения и сокращения минералов средней плотности в зависимости от влажности

Полученные результаты исследований позволяют оценить область эффективной сепарации сыпучего материала на винтовом сепараторе и возможность использования его для достижения более высоких значений извлечения, степени концентрации и сокращения исходного материала.

Все разработанные и изготовленные оборудования прошли различные этапы реализации, в том числе опытно-промышленные испытания на рудах, добываемых в настоящее время на месторождениях золота в Республике Саха (Якутия).

Разработанный и изготовленный пневмосепаратор ПОС-2000 (рис.6) прошел опытно-промышленные испытания на месторождении Одолго (Амурская обл.), руда которого отличалась высокой долей свободного относительно крупнофракционного золота. Техническая характеристика ПОС-2000: производительность – 6 т/ч; мощность – 5 кВт; сокращение исходного материала



Рис.6. Пневмосепаратор ПОС-2000

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

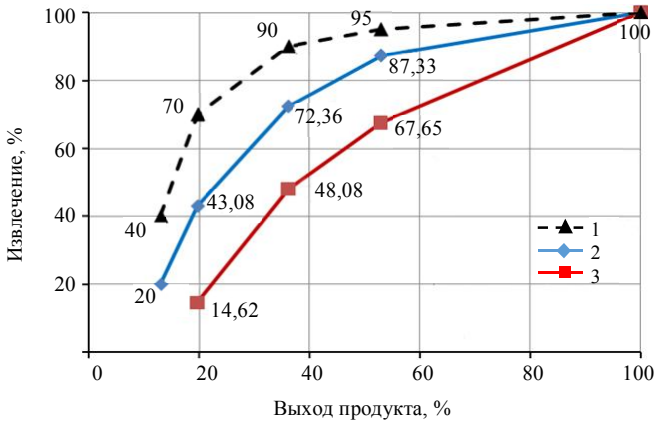


Рис. 7. Зависимость извлечения флюорита от выхода продукта при содержаниях, %: 9,8 (1); 35 (2); предполагаемое извлечение при содержании < 1 (3)

(для золотых руд) – до 16 раз; масса – 2100 кг; производительность вентилятора – 500-1500 м^3/ч.

Пневмосепаратор ПОС-2000 испытывался в комплексе с разработанными аппаратами рудоподготовки (дробилка ДКД-300, центробежный измельчитель ЦМВУ-800). Результаты приведены в табл.4.

На месторождении рудного золота Задержнинское при пневматической сепарации тонкоизмельченного материала класса −2 мм на ПОС-2000 достигнуто сокращение в 14-16 раз, установлена эффективная пневмосепарация без существенной потери производительности и извлечения золота, которая обеспечивается при влажности до 7 %.

Таблица 4

Сводные результаты обогащения ПОС-2000 по рудному золоту

Технологические показатели	Содержание, г/т	Распределение материала, %	Степень концентрации, %	Извлечение, %
Хвосты	0,63	16	–	1,36
Концентрат	732	1	1159,28	98,64
Руда	43,65	17	1	100

Пневмосепаратор также испытывался при обогащении минералов средней плотности, в частности флюорита (рис.7). Установлена закономерность – при снижении содержания флюорита в руде, поступающей на пневмосепарацию, происходит увеличение извлечения флюорита в концентрат. Так, при содержании флюорита в руде 35 % извлечение в 56 %-ный концентрат составляет 67,65 %, с уменьшением содержания флюорита до 9,8 % наблюдается повышение извлечения до 87,33 %.

Применительно для руд с низким содержанием мелкого тонкого золота из концентратов пневмосепарации возможно, например, использование методов флотации [36, 37], бактериально-химического выщелачивания [38], которые широко применяются в горнодобывающей промышленности.

Следующие этапы развития пневмосепарации связаны с повышением эффективности разделения минеральных смесей, формируемых в аэродинамические потоки при воздействии различных физических полей с целью повышения степени сокращения и концентрации. Проведенные исследования доказывают, что разрабатываемые и разработанные методы пневмосепарации могут использоваться при обогащении полезных компонентов (минералов) средней и высокой плотности.

Заключение. Разработаны и апробированы высокоэффективные опытные образцы горно-обогатительного оборудования: дробилки многократного динамического воздействия РД-МДВ-900, ДКД-300, центробежные измельчители ЦМВУ-800 и ВЦИ-12, пневмосепаратор ПОС-2000, разработаны принципиальные конструкции и проектируется ряд новых аппаратов рудоподготовки и пневматического обогащения. Установлена самая высокая степень дробления для новой высокопроизводительной дробилки РД-МДВ-900 со значением 12. Показана эффективность апробации автономного комплекса сухого обогащения с новыми безопасными стандартами экологии по переработке золотосодержащих руд, позволяющих полностью раскрыть и извлечь свободное золото крупностью от 10000 до 100 мкм.

В частности, это подтвердилось на примере переработки золотосодержащих руд ряда месторождений: Нежданинское, Дуэт, Сарылах, Малтан, Нагорное, Якутское, Вьюн, Мало-Тарынское (Якутия), Гурбей (Иркутская обл.), где получены результаты, подтверждающие эффективность сухого обогащения руд со свободным золотом.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Перспективы использования сухого метода обогащения в горнодобывающей промышленности являются очень высокими. Например, его внедрение позволит в последующем отказаться от строительства больших обогатительных фабрик, полностью или частично от применения технологической воды, сооружения системы водоснабжения, традиционного хвостохранилища и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Юсупов Т.С.* Совершенствование процессов раскрытия минеральных сростков при освоении труднообогатимых объектов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 3. С. 143-149.

2. *Sotoudeh F., Nehring M., Kizil M.S., Knights P.* Integrated underground mining and pre-concentration systems; a critical review of technical concepts and developments // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2020. Vol. 35. Iss. 3. P. 153-182. DOI: 0.1080/17480930.2020.1782573

3. *Chelgani S.C., Neisiani A.A.* Dry Mineral Processing. Cham: Springer, 2022. 156 p. DOI: 10.1007/978-3-030-93750-8

4. *Красногоров В.О., Тупиков Д.Ю., Тупиков А.Д.* Новые разработки в области электрического обогащения руд и россыпей // Горная промышленность. 2020. № 5. С. 30-31.

5. *Lakshmanan V.I., Ojaghi A., Gorain B.* Beneficiation of Gold and Silver Ores // Innovations and Breakthroughs in the Gold and Silver Industries. Switzerland: Springer, 2019. P. 49-77. DOI: 10.1007/978-3-030-32549-7_4

6. *Nunna V., Hapugoda S., Eswarappa S.G. et al.* Evaluation of Dry Processing Technologies for Treating Low Grade Lateritic Iron Ore Fines // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2022. Vol. 43. Iss. 3. P. 283-299. DOI: 10.1080/08827508.2020.1837127

7. *Tripathy S.K., Banerjee P.K., Suresh N. et al.* Dry high-intensity magnetic separation in mineral industry – a review of present status and future prospects // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2017. Vol. 38. Iss. 6. P. 339-365. DOI: 10.1080/08827508.2017.1323743

8. *Gong D., Nadolski S., Sun C. et al.* The effect of strain rate on particle breakage characteristics // Powder Technology. 2018. Vol. 339. P. 595-605. DOI: 10.1016/j.powtec. 2018.08.020

9. *Мамонов С.В., Закирничный В.Н., Метелев А.А. и др.* Перспективные технологии раскрытия минерального сырья при подготовке к флотационному обогащению // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2019. № 5. С. 158-169. DOI: 10.15372/FTPRPI20190517

10. *Wen-tao Zhou, Yue-xin Han, Yong-sheng Sun et al.* Multi-scale impact crushing characteristics of polymetallic sulphide ores // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2019. Vol. 29. Iss. 9. P. 1929-1938. DOI: 10.1016/S1003-6326(19)65100-9

11. *Хопунов Э.А.* Новый взгляд на процессы переработки минерального сырья // Современная техника и технологии. 2015. № 3. URL: http://technology.snauka.ru/2015/03/5944 (дата обращения 18.04.2015).

12. *Nied R.* Rotor Impact Mills // Handbook of Powder Technology. Amsterdam: Elsevier, 2007. Vol. 12. P. 229-249. DOI: 10.1016/S0167-3785(07)12008-X

13. *Lomovskiy I., Bychkov A., Lomovsky O., Skripkina T.* Mechanochemical and Size Reduction Machines for Biorefining // Molecules. Vol. 25. Iss. 22. № 5345. DOI: 10.3390/molecules25225345

14. *Ballantyne G.R., Powell M.S.* Benchmarking comminution energy consumption for the processing of copper and gold ores // Minerals Engineering. 2014. Vol. 65. P. 109-114. DOI: 10.1016/j.mineng.2014.05.017

15. *Neikov O.D.* Mechanical Crushing and Grinding // Handbook of Non-Ferrous Metal Powders. Amsterdam: Elsevier, 2009. P. 47-62. DOI: 10.1016/B978-1-85617-422-0.00002-1

16. *Dey S.K., Dey S., Das A.* Comminution Features in an Impact Hammer Mill // Powder Technology. 2013. Vol. 235. P. 914-920. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.12.003

17. *Hee Chan Cho, Kwan Ho Kim, Hoon Lee, Dong Jun Kim.* Study of residence time distribution and mill hold-up for a continuous centrifugal mill with various G/D ratios in a dry-grinding environment // Minerals Engineering. 2011. Vol. 24. Iss. 1. P. 77-81. DOI: 10.1016/j.mineng.2010.10.013

18. *Вайтехович П.Е., Боровский Д.Н., Гребенчук П.С., Таболич А.В.* Определение основных параметров ударного взаимодействия абразивных частиц с лопатками роторного ускорителя центробежной мельницы // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2018. № 3. С. 12-15.

19. *Bardovskiy A.D., Gorbatyuk S.M., Keropyan A.M., Bibikov P.Ya.* Assessing Parameters of the Accelerator Disk of a Centrifugal Mill Taking into Account Features of Particle Motion on the Disk Surface // Journal of Friction and Wear. 2018. Vol. 39. P. 326-329. DOI: 10.3103/S1068366618040037

20. *Уракаев Ф.Х., Шумская Л.Г., Кириллова Е.А., Кондратьев С.А.* Совершенствование технологии тонкого измельчения техногенного сырья на основе его дозированного стадийного разрушения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 5. С. 165-175. DOI: 10.15372/FTPRPI20200519

21. *Львов Е.С., Матвеев А.И.* Изучение формирования гранулометрического состава и раскрытия минералов при дроблении руд с использованием дробилки многократного динамического действия ДКД-300 // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 10. С. 112-116.

22. *Матвеев А.И., Львов Е.С., Осипов Д.А.* Обоснование применения дробилки комбинированного ударного действия ДКД-300 в схеме сухого обогащения кимберлитовых руд трубки «Зарница» // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 4. С. 107-115.

23. *Матвеев А.И., Львов Е.С., Заикина А.В.* Особенности механического разрушения золотосодержащих руд месторождения Гурбей ударными динамическими воздействиями // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. № 2. С. 141-150. DOI: 10.15372/FTPRPI20210215

24. *Матвеев А.И., Львов Е.С.* Разработка методики определения степени дезинтеграции геоматериалов в процессе многократного ударного дробления // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 2. С. 137-142. DOI: 10.15372/FTPRPI20200216

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

25. Патент № 2746502 B02C 7/00. Вертикальный центробежный измельчитель / А И.Матвеев, В.Р.Винокуров, А.Н.Григорьев. Опубл. 14.04.2021. Бюл. № 11.

26. *Tripathy S.K., Singh V., Murthy Y.R. et al.* Influence of process parameters of dry high intensity magnetic separators on separation of hematite // International Journal of Mineral Processing. 2017. Vol. 160. P. 16-31. DOI: 10.1016/j.minpro.2017.01.007

27. *Сединкина Н.А., Горлова О.Е., Гмызина Н.В., Дегодя Е.Ю.* Изучение возможности обогащения мелкодробленой магнетитовой руды сухой магнитной сепарацией // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 5. С. 564-571. DOI: 10.32339/0135-5910-2019-5-564-571

28. *Пелевин А.Е., Сытых Н.А., Черепанов Д.В.* Влияние крупности частиц на эффективность сухой магнитной сепарации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 11-1. С. 293-305. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_293

29. Патент № 2699287 РФ. Устройство для сухого обогащения золотых руд / А.В. Шеленин. Опубл. 04.09.2019.

30. *Бауман А.В., Степаненко А.И., Степаненко А.А.* Практические результаты и перспективы сухого обогащения руд и нерудных материалов методом пневмосепарации // Горный журнал. 2019. № 3. С. 40-44. DOI: 10.17580/gzh.2020.03.07

31. *Chenlong Duan, Chenyang Zhou, Liang Dong et al*. A novel dry beneficiation technology for pyrite recovery from high sulfur gangue // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 172. P. 2475-2484. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.11.162

32. *Jingfeng Hea, Qiang Bai, Tianye Du*. Beneficiation and upgrading of coarse sized low-grade bauxite using a dry-based fluidized bed separator // Advanced Powder Technology. 2020. Vol. 31. Iss. 1. P. 181-189. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.11.162

33. *Baawuah E., Kelsey C., Addai-Mensah J., Skinnera W.* Assessing the performance of a novel pneumatic magnetic separator for the beneficiation of magnetite ore // Minerals Engineering. 2020. Vol. 156. № 106483. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106483

34. *Honaker R.Q., Saracoglu M., Thompson E. et al.* Upgrading Coal Using a Pneumatic Density-Based Separator // International Journal of Coal Preparation and Utilization. 2008. Vol. 28. Iss.1. P. 51-67. DOI: 10.1080/19392690801934054

35. *Матвеев А.И., Лебедев И.Ф., Никифорова Л.В., Яковлев Б.В.* Моделирование движения частиц в винтовом пневмосепараторе // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 10. С. 172-178.

36. *Александрова Т. Н., Элбендари А.М.* Повышение эффективности переработки фосфатных руд флотационным методом // Записки Горного института. 2021. Т. 248. С. 260-271. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.10

37. *Aleksandrova T., Elbendari A., Nikolaeva N.* Beneficiation of a low-grade phosphate ore using a reverse flotation technique // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2022. Vol. 43. Iss. 1. P. 22-27. DOI: 10.1080/08827508.2020.1806834

38. *Киореску А.В.* Интенсификация бактериально-химического выщелачивания никеля, меди и кобальта из сульфидной руды с применением микроволнового излучения // Записки Горного института. 2019. Т. 239. С. 528-535. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.528

***Авторы*: А.И.Матвеев,** *д-р техн. наук, заведующий лабораторией, andrei.mati@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-4298-5990* (*Институт горного дела Севера им. Н.В.Черского СО РАН, Якутск, Россия*), **И.Ф.Лебедев,** *канд. техн. наук, старший научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0003-1116-8872* (*Институт горного дела Севера им. Н.В.Черского СО РАН, Якутск, Россия*), **В.Р.Винокуров,** *младший научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0001-5698-7922* (*Институт горного дела Севера им. Н.В.Черского СО РАН, Якутск, Россия*), **Е.С.Львов,** *младший научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-3843-0714* (*Институт горного дела Севера им. Н.В.Черского СО РАН, Якутск, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0