

АНАЛИЗ СИСТЕМ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ И РАЗДЕЛЕНИЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ СЕПАРАТОРОВ: ПОИСК ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ РАБОТЫ

Д. Н. Шибаета¹, С. В. Терещенко^{1,2}, Б. А. Власов¹, П. А. Шумилов¹, В. В. Булатов¹

¹ Кольский научный центр Российской академии наук, Апатиты, Россия

² Мурманский арктический государственный университет, Россия

Аннотация: проведено анализ систем транспортирования и разделения радиометрических сепараторов. Показано, что основным отличием российских и зарубежных сепараторов является их производительность, определяемая в первую очередь применяемыми системами транспортирования. В зарубежных сепараторах для перемещения кускового материала в зону его облучения и регистрации используется конвейерная лента, движущаяся со скоростью не менее 3 м/с. Российские производители в основном применяют вибропитатели с профилированным лотком, обеспечивающим формирование покусового режима движения и измерения материала. Облучение куска рудной массы и регистрация сигнала вторичного излучения от куска производится на траектории свободного падения, где его скорость в зоне облучения и регистрации не превышает 2 м/с. Эффективность разделения для сепараторов, в которых для перемещения рудной массы в зону облучения и регистрации используется конвейерная лента, не обеспечивает качественного разделения за одну операцию, что обусловлено высокой загруженностью ленты и сложностью идентификации отдельных кусков рудной массы. Снижение качества разделения в радиометрическом сепараторе может быть обусловлено применяемыми исполнительными механизмами. Авторами предложено дополнительное устройство, объединяющее в единую систему устройство транспортирования и исполнительный механизм, непосредственно осуществляющий процесс разделения. В среде Rocky DEM проведена предварительная оценка конструкции системы транспортирования, получены параметры работы вибропитателей и барабанного раскладчика, обеспечивающие стопроцентное извлечение зарегистрированных системой регистрации кусков горной массы с кондиционным содержанием ПК.

Ключевые слова: предконцентрация, радиометрические сепараторы, система транспортирования, конвейерная лента, вибропитатели, исполнительный механизм, эффективность разделения, гранулометрический состав, производительность.

Для цитирования: Шибаета Д. Н., Терещенко С. В., Власов Б. А., Шумилов П. А., Булатов В. В. Анализ систем транспортирования и разделения радиометрических сепараторов: поиск путей повышения эффективности их работы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5–2. – С. 338–349. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_338.

Analysis of transport and separation systems in radiometric separators: Ways to improve their efficiency

D. N. Shibaeva¹, S. V. Tereshchenko^{1,2}, B. A. Vlasov¹, P. A. Shumilov¹, V. V. Bulatov¹

¹ Mining Institute Subdivision of the Federal Research Centre Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

² Murmansk Arctic State University, Russia

Abstract: The paper analyzes the transport and separation systems in radiometric separators. The main difference between radiometric separators manufactured in Russia and abroad is their capacity governed, first of all, by the transport system type. Foreign separators use belts having speeds of 3 m/s at least to deliver lumpy material to the zone of primary radiation and data recording. Russian manufacturers mostly use vibrating feeders with a shaped tray in the separator transport system. Radiation treatment of ore lumps and back radiation recording is performed along a free-fall trajectory, at the lump speed in the radiation and recording zone not higher than 2 m/s. The separation efficiency of separators with a conveyor belt to transport ore to the radiation and recording zone fails to provide high-quality separation in a single operation due to the high load of the belt and owing to identification complexity of some lumps. The separation quality degradation in a radiometric separator is also possible due to separation systems used. The authors propose an additional device that integrates the transport system and the separation system into a single assembly. In Rocky DEM software environment, the authors have performed preliminary evaluation of the transport system design and determined working conditions of vibrating feeders and drum-type spreaders to ensure 100 % separation of lumps with standard content of useful component as per the recording system data.

Key words: pre-concentration, radiometric separators, transport system, conveyor belt, vibrating feeders, separation system, separation efficiency, grain size composition, productivity.

For citation: Shibaeva D. N., Tereshchenko S. V., Vlasov B. A., Shumilov P. A., Bulatov V. V. Analysis of transport and separation systems in radiometric separators: Ways to improve their efficiency. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5–2):338–349. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_338.

Введение

Минерально-сырьевая база России является одним из её основных стратегических потенциалов. Однако большинство рудных месторождений по многим видам полезных ископаемых в ближайшем будущем могут быть представлены бедными рудами сложного вещественного состава со значительными колебаниями содержания полезных компонентов (ПК). Такая перспектива обусловлена, во-первых, исчерпанием запасов богатых руд в предыдущие годы эксплуатации, во-вторых, усложнением горно-геологических условий отработки залежей разрабатываемых месторождений и применением высокопроизводительного оборудования для добычи руды. Например, существенное падение содержания ПК по различным видам полезных ископаемых наблюдается

на месторождениях, расположенных на территории Кольского полуострова:

- по медно-никелевым рудам содержания Ni и Cu снизились с 0,90 и 0,30 до 0,26 и 0,06 соответственно;
- по железосодержащим рудам содержание $Fe_{\text{общ}}$ снизилось с 28,00 до 20,35 %;
- по апатитсодержащим рудам содержание P_2O_5 уменьшилось более чем в 2 раза с 25 до 12 %;
- по лопаритовым рудам содержание лопарита снизилось с 3,0–4,0 % до 1,8–2,5 %.

Приведенные факты подтверждают повышенную вероятность подачи на обоганительную фабрику (ОФ) обедненного по содержанию основных полезных компонентов сырья с существенным колебанием в нем ПК. Поэтому для его эффективной переработки необходимо создавать ресур-

сосберегающие экологически сбалансированные технологии с развитым переделом рудоподготовки, включающим процесс предконцентрации добытой горной массы, посредством применения интеллектуального оборудования с высокой степенью автоматизации его устройств и систем. Такой подход, несомненно, способствует стабилизации вещественного состава питания ОФ, создавая благоприятные условия реализации последующих процессов дезинтеграции рудной массы и её «глубокого» обогащения. Применяемое для осуществления процесса предконцентрации оборудование позволяет получать достоверную информацию о качестве разделяемого кускового материала, обеспечивая эффективное удаление из технологического потока части пустой и слабоминерализованной породы. В результате чего уменьшается количество породной составляющей в руде, поступающей на «глубокое» обогащение, и, соответственно, количество тонкоизмельченных хвостов обогащения — источников повышенной экологической опасности. Таким образом, процесс предконцентрации оказывает положительное влияние на вещественный состав руды и процессы рудоподготовки и обогащения, а также снижает негативное воздействие горного производства на окружающую среду. Именно поэтому актуальность и целесообразность включения в технологию переработки бедной руды процессов предконцентрации не вызывает сомнения, и подтверждается результатами лабораторных и опытно-промышленных испытаний на различных типах руд, способствует повышению экономической привлекательности при вовлечении в переработку некондиционных запасов и отходов горного производства [1 — 9].

Обзор разработок радиометрических сепараторов и анализ конструкций систем транспортирования в них рудной массы в зону облучения и регистрации

К технологическому интеллектуальному оборудованию, реализующему процесс предконцентрации кускового материала добытой горной массы, относятся радиометрические сепараторы. Их интеллектуальная система позволяет получать информацию о содержании ПК в кусковом материале горных пород, основанную на регистрации физических явлений, возникающих при взаимодействии с ним различных видов излучений. В результате анализа полученной информации обеспечивается возможность реализации оперативного контроля качества сепарируемого материала горной массы, его разделение на рудный продукт с регламентированным содержанием ПК и породный продукт, выход и качество которого, также как и для рудного продукта, определяется в любой заданный момент времени.

Российский рынок радиометрических сепараторов обеспечивается продукцией таких компаний, как НПП «Буревестник» (г. Санкт-Петербург), производящих сепараторы для обогащения алмазосодержащего сырья; ООО «РАДОС», ООО «КРАСРАДОС», ООО «ТЕХНОРОС» (г. Красноярск), ООО «Техносорт» (г. Екатеринбург), АО «Иргиредмет» (г. Иркутск), разрабатывающих и изготавливающих оборудование для предварительного обогащения полезных ископаемых на основе рентгенорадиометрического метода; ООО «ЭГОНТ» (г. Санкт-Петербург), разрабатывающих рентгенолюминесцентные и рентгенорадиометрические сепараторы для обогащения кускового материала вкрапленных руд.

Крупнейшими зарубежными производителями сортировочного оборудования являются фирмы «TOMRA» и «STEINERT» (Германия). Их специалистами создан ряд радиометрических сепараторов, использующих эмиссионные и абсорбционные различия кускового материала горных пород при воздействии на него различных видов излучений.

Среди основных отличий российских и иностранных разработчиков и производителей радиометрических сепараторов производительность оборудования, определяемая, в первую очередь, применяемыми системами транспортирования.

В зарубежных сепараторах для размещения кускового материала в зону его облучения первичным излучением и регистрации возникающего в нем вторичного излучения (сигнала), характеризующего содержание ПК в кусках, используется конвейер, лента которого движется со скоростью не менее 3 м/с. Анализ видео-роликов радиометрической сепарации, имеющихся в открытом доступе, свидетельствует о высокой загруженности ленты. Толщина слоя рудной массы, находящейся на поверхности ленты, превышает размер максимальной крупности куска. При этом производительность сепараторов находится на уровне 100 т/ч (данное значение расчетное и отражает производительность при максимальной крупности материала). Такое расположение рудной массы на поверхности конвейерной ленты (полное наложение кусков друг на друга, частичное перекрытие) затрудняет определение координат кусков с кондиционным содержанием ПК, что неизбежно снижает эффективность работы разделяющего устройства, приводя к их потерям с отвальным продуктом и повышая вероятность извлечения породных кусков в концентрат сепарации. Именно

поэтому, в технологических схемах, сортировочное оборудование которых имеет конструктивное исполнение, подобное сепараторам фирм «TOMRA» и «STEINERT» (Германия), формирование обогащенного продукта проходит как минимум в две операции, например, в процессе предварительной сортировки хромитовой руды месторождений, разрабатываемых компанией «Ferbasa» (Бразилия), с использованием сепараторов компании «STEINERT».

Для повышения эффективности идентификации кусков рудной массы при использовании конвейерной ленты разработан ряд технологических решений: формирование однорядного сплошного потока кусков за счет выполнения ряда канавок непосредственно в полотне ленты по всей длине конвейера; система с последовательно расположенными ленточными транспортерами с вертикальным смещением друг относительно друга, скорость следующего по ходу транспортировки кусков транспортера больше скорости предыдущего [10]. Однако, по мнению авторов патента [11], формирование канавок непосредственно в полотне по длине ленты конвейера не обеспечит точного позиционирования кусков при износе канавок при предусматриваемой в этом решении диагностике кусков «на просвет» через полотно ленты. Кроме того, неисправность одного из каналов, а в каждой канавке имеется индивидуальные измеритель и исполнительное устройство, сведет на нет результат всей многоканальной сортировки. Система с последовательно расположенными ленточными транспортерами с вертикальным смещением друг относительно друга значительно усложняет и удорожает конструкцию сепаратора.

Проведенный анализ свидетельствует о завышении производитель-

ности сепараторов с конвейерной системой транспортирования. Кроме того, если оценить удельную производительность (на единицу занимаемой площади) таких сепараторов, то она становится ещё ниже, уменьшаясь, например, на классе — 50+20мм до 40—50 т/ч. Повышение эффективности сепарации можно обеспечить путем формирования на конвейерной ленте монослоя кускового материала, в котором четко позиционируется каждый кусок, однако при этом заполнение ленты составит не более 50 %, что снижает заявленную разработчиком производительность.

Российские производители в системе транспортирования сепаратора в основном применяют вибропитатели (ВП) с профилированным лотком, имеющим несколько каналов. Каждый канал лотка формирует однорядный поток, в котором куски следуют друг за другом, обеспечивая покусковый режим движения материала. В данном случае облучение куска рудной массы потоком первичного излучения и регистрация сигнала вторичного излучения от куска производится на траектории свободного падения, где его скорость в зоне облучения и регистрации не превышает 2 м/с. Производительность отечественных сепараторов не превышает 40 т/ч.

В работе [12] представлены результаты сравнительного анализа режима перемещения кусков рудной массы в зону облучения и регистрации посредством вибропитателей и ленточных конвейеров, проведенного программном комплексе Rocky DEM. Установлена целесообразность применения в качестве транспортирующего устройства ВП, обеспечивающего наряду с формированием «ручьевого» потока кускового материала возможность выделения мелочи, образованной при перемещении руды, и сниже-

ния пылеобразования в зоне облучения и регистрации. Показана возможность увеличения производительности сепаратора за счет применения треугольной формы канала лотка ВП, при которой происходит формирование траектории движения однорядного потока кусков близкой к прямолинейной, сокращая при этом путь их перемещения и, соответственно, уменьшая время прохождения кусков от зоны разгрузки из бункера сепаратора до его зоны облучения и регистрации.

Снижение качества разделения в радиометрическом сепараторе может быть также обусловлено применяемыми исполнительными механизмами, поскольку сигнал на его срабатывание происходит через фиксированное время, а разделение, как правило, реализуется на траектории свободного падения куска, характеризующейся своей нестабильностью в области расположения исполнительного механизма. Колебания траектории свободного падения обусловлены вариациями размеров кусков в пределах одного класса крупности, приводящими в результате к изменению расстояния от поверхности кусков до источника первичного излучения и до детектора, регистрирующего вторичное излучение от них [13]. При проведении опытно-промышленных испытаний технологии сепарации апатитсодержащих руд с использованием сепаратора фирмы ООО «ЭГОНТ» (система транспортирования: плоский разгрузочный ВП и профилированный транспортирующий ВП с параболическим профилем лотка), использующего в качестве исполнительного механизма электропневмоклапаны (по одному на канал для кусков крупностью — 50+20мм) с фиксированным временем задержки на срабатывание исполнительного механизма, установлено наличие

в среднем 12 % потерь рудных кусков с хвостовым продуктом и разубоживание концентрата сепарации пустыми и слабоминерализованными породами не менее, чем на 3 % [14].

Таким образом, проведенный анализ выявил основные причины, влияющие на эффективность разделения кускового материала горной массы посредством радиометрического сепаратора, определяемые системами транспортирования и разделения: формирование покускового режима — последовательного движения образцов через зону облучения и регистрации на расстоянии, обеспечивающего их отдельную идентификацию; минимизацию разброса траектории движения куска в свободном падении для снижения отклонения поверхности исследуемого образца от источника первичного излучения и детектора, для стабилизации времени прохождения образца от зоны облучения и регистрации до зоны разделения. Поэтому целью работы является совершенствование системы транспортирования и разделения, направленное на повышение эффективности сепарации за счёт снижения влияния крупности и плотности кусков разделяемой руды.

Совершенствование системы транспортирования радиометрического сепаратора

Установлено, что для минимизации различий в размерах кусков в пределах сепарируемой крупности и плотностных характеристик породных и минеральных разновидностей, слагающих разделяемый материал, целесообразно проводить измерение образцов на поверхности транспортирующего устройства, где разброс расстояний от источника первичного излучения до поверхности исследуемого образца и от образца до детектора вторичного

излучения определяется диапазоном крупности сепарируемого материала. Второе условие повышения эффективности сепарации — минимизация отклонения расчетного и фактического времени прохождения куска от зоны облучения и регистрации до зоны разделения.

Одним из решений, учитывающим соблюдение перечисленных условий, является дополнение системы транспортирования новым элементом, прототипом которого служит барабанный питатель с углублениями в форме трапеции на его поверхности, удерживающими частицы движущегося материала [15]. При увеличении скорости вращения данного элемента транспортной системы повышается вероятность выскакивания частиц из ячеек. Устранить этот отрицательный эффект предлагается включением в систему транспортирования барабанного раскладчика с ячейками (рис. 1), соответствующими размеру сепарируемых кусков и расположенными равномерно по окружности барабана. Дно каждой ячейки выполнено в виде откидывающейся пластины с двумя фиксированными положениями: закрытым — в зоне облучения кусков первичным излучением и регистрации от них вторичного излучения, и открытым — в зоне выделения кусков с регламентированным содержанием полезного компонента в концентрат сепарации (зона отсечки). Открытие дна ячейки осуществляется исполнительным механизмом, выполненным в виде подвижного фиксатора дна каждой ячейки, удерживающего откидывающуюся пластину в закрытом положении в зоне облучения и освобождающего её от фиксации в зоне отсечки. Для возвращения откидывающейся пластины (дна ячейки) в исходное положение используется ролик, расположенный с внутренней стороны

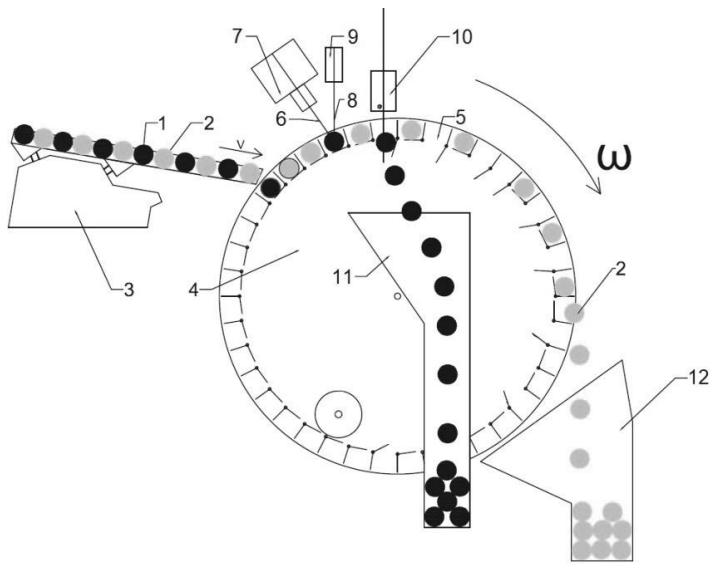


Рис. 1. Схема опытного образца люминесцентного сепаратора: ω — угловая скорость вращения барабанного раскладчика; 1, 2 — куски руды; 3 — транспортирующий вибропитатель; 4 — барабанный раскладчик; 5 — ячейки барабанного раскладчика; 6 — первичное излучение; 7 — рентгеновская трубка; 8 — вторичное излучение; 9 — фотоприемник; 10 — исполнительный механизм; 11 — концентратный желоб; 12 — хвостовой желоб

Fig. 1. Layout of prototype luminescence separator: ω — rotational speed of drum-type spreader; 1, 2 — ore lumps; 3 — vibrating feeder; 4 — drum-type spreader; 5 — cells of drum-type spreader; 6 — primary radiation; 7 — X-ray tube; 8 — back radiation; 9 — photodetector; 10 — separation system; 11 — concentrate chute; 12 — waste chute

барабанного раскладчика, устанавливающий откидывающиеся пластины в исходное положение.

Предлагаемая система позволяет в одном устройстве радиометрического сепаратора реализовать транспортирование кускового материала и его разделение на продукты — полезный и породный, при этом в концентрат надёжно, со стопроцентной вероятностью выделяются зарегистрированные системой регистрации полезные куски. Это обеспечивается за счёт того, что скорость вращения барабанного раскладчика и, соответственно, линейная скорость перемещения кусков от зоны регистрации до зоны отсечки стабильна, что позволяет исключить ошибку при жестко заданной задержке

на срабатывание исполнительного механизма. При облучении и регистрации кусков в ячейке барабанного раскладчика колебания расстояния от источника первичного излучения до поверхности образца и от образца до детектора определяются только линейными размерами кусков.

Моделирование процесса движения кусков рудной массы в радиометрическом сепараторе

Для предварительной оценки режимов работы каждого из устройств и их взаимодействия в среде Rocky DEM, использующей для моделирования метод дискретных элементов, создана кинематическая модель транспортной системы радиометрического сепара-

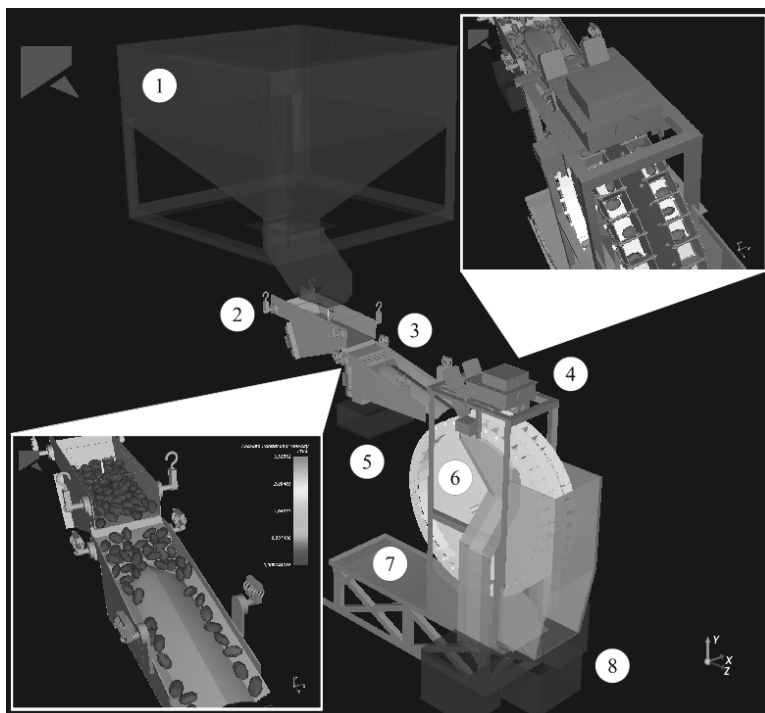


Рис. 2. Модель опытного образца люминесцентного сепаратора в среде Rocky DEM: 1 – загрузочный бункер, 2 – разгрузочный вибропитатель, 3 – транспортирующий вибропитатель, 4 – система облучения и регистрации, 5 – бункер для отсева, 6 – барабанный раскладчик, 7 – корпус установки, 8 – приемные бункеры

Fig. 2. Rocky DEM model of prototype luminescence separator: 1 – loading bunker; 2 – discharging vibrating feeder; 3 – transporting vibrating feeder; 4 – radiation and recording system; 5 – screenings bunker; 6 – drum-type spreader; 7 – housing; 8 – intake bunkers

тора, дополненная также элементами загрузки и разгрузки рудной массы (рис. 2).

В качестве начальных условий моделирования заданы:

- силы, действующие на кусок при его движении по лотку вибропитателя (сила тяжести, импульс от колебания лотка), условия взаимодействия кусков рудной массы с поверхностью лотка вибропитателя и между собой заданы исходя из справочных значений;

- минералого-технологические характеристики, форма и крупность кусков рудной массы, ее фракционный состав определены исходя из экспериментальных данных о гранулометрическом составе апатитсодержащей руды

Хибинских месторождений, плотность задана исходя из справочных значений.

Подбор динамических параметров работы сепаратора – режимов подачи руды, работы разгрузочного и транспортирующего вибропитателей, скорость вращения барабанного раскладчика реализован посредством применения итерационного метода. Установлены оптимальные характеристики работы элементов системы транспортирования кусков рудной массы в зону облучения и регистрации, обеспечивающие разгрузку бункера с рудой без образования навала и формирование однорядного движения кусков по поверхности лотка транспортирующего вибропитателя:

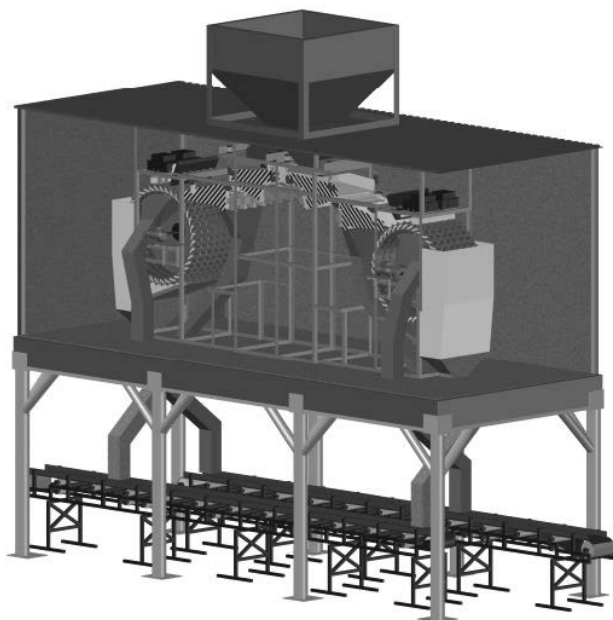


Рис. 3. Модель опытного образца многоканального люминесцентного сепаратора, расположенного в морском 20-футовом контейнере

Fig. 3. Model of prototype multichannel luminescence separator arranged in 200 feet shipping container

- разгрузочный ВП — частота колебаний 35 Гц, амплитуда — 1 мм;
- транспортирующий ВП — частота колебаний 45 Гц, амплитуда — 1 мм.

При таких параметрах работы ВП — средняя скорость движения кускового материала по профилированной части транспортирующего ВП равна 0,35 м/с. Для минимизации числа пустых ячеек, а также попадания в одну ячейку нескольких кусков (не более 10 %) при установленных параметрах работы ВП определена скорость вращения барабанного раскладчика — 10 об/мин. При этих параметрах барабанного раскладчика обеспечивается стопроцентное извлечение зарегистрированных системой регистрации кусков горной массы с кондиционным содержанием ПК.

Расчеты производительности сепаратора при полученных в результате

моделирования в среде Rocky DEM параметрах работы устройств транспортирования на примере апатит-нефелиновой руды крупностью — 50+20мм (средний размер куска 40 мм, средняя масса куска 70 г) показали, что количество руды, прошедшей за 1 ч по одному каналу сортировки руды составляет 1,7 т. Многоканальный сепаратор на 12 сортировочных каналов разделяет 20 т/ч (рис. 3). Габаритные размеры такого сепаратора (L×B×H) составляют 4,82×1,2×2,13 м.

Производительность люминесцентного сепаратора ЛСМ-50 фирмы ООО «ЭГОНТ» на крупности — 50+20мм составляет 10 т/ч, габаритные размеры сепаратора (L×B×H) 1,97×1,22×1,55 м. Габаритные размеры двух сортировочных машин ООО «ЭГОНТ» соизмеримы с разрабатываемой моделью сепаратора, однако результаты

опытно-промышленных испытаний [14] свидетельствуют о необходимости реализации дополнительной перемешивающей операции или снижения производительности. Кроме того, для осуществления процесса разделения вне фабрики, например, на перегрузочном складе, необходима компрессорная установка, обеспечивающая сепаратор воздухом для работы электропневмоклапанов.

Заключение

Обоснованное новое конструктивное решение, объединяющее в единую систему устройство транспортирования рудной массы в зону облучения и регистрации, и исполнительный механизм, непосредственно осуществляющий процесс разделения, позволило минимизировать влияния различий в размерах кусков в пределах сепарируемой крупности и плотност-

ных характеристик породных и минеральных разновидностей, слагающих разделяемый материал за счет проведения операции облучения и регистрации в ячейке барабанного раскладчика. Реализованный в данном устройстве исполнительный механизм исключает возможность выделения случайного куска, поскольку сигнал на изменение положения подвижного фиксатора и перевод дна ячейки в открытое положение вырабатывается для конкретной ячейки, перемещающейся от зоны облучения и регистрации до зоны отсечки за время, определяющееся скоростью вращения барабанного раскладчика. Предложенная система обеспечивает реализацию кускового режима разделения при 100 % извлечении зарегистрированных кусков с кондиционным содержанием ПК и минимальном разубоживании обогащенного продукта породными кусками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shemyakin V., Skopov S., Klimentenok G., Panov A.* Theory and practice of bauxite X-ray sorting // *Light Metals*. — 2015. — Pp. 5–10
2. *Knapp H., Robben M., Dehler M., Wotruba H.* X-ray transmission sorting of tungsten ore / Conference: Optical Characterization of Materials At: Karlsruhe, Germany March 2013
3. *Alblooshi A., Shammout M., Ouda O., Umar Imtiaz Ahmed, WasiUl Hassan* Conceptual MSW Landfill Design and Waste-To-Energy Recovery Potential for Greater Dammam Area // *PMU*. — 2016. — 99p.
4. *Короткевич В. А., Кухаренко И. Е., Дадли Френк Томас* Уникальные технологии мониторинга качества и обогащения минерального сырья // *Золото и технологии*. — 2014. — №4(26)
5. *Короткевич В. А., Кухаренко И. Е., Беляк А. А., Короткевич Е. В.* Инновационные технологии и оборудование в предварительном обогащении минерального сырья // *Добывающая промышленность*. — 2017. — №2. — С.168–172
6. *Курков А. В. Ануфриева С. И. Соколова В. Н. Кыджды М. В. Чепрасов И. В. Троцкий А. В. Гришаев Г. С. Каплин А. И.* Информационно-аналитические материалы: Мировые достижения развития методов, техники и технологий переработки минерального сырья. Серия: Обогащение минерального сырья. М.: Изд-во ВИМС, 2020. — 52 с.
7. *Robben C., Wotruba H.* Sensor — Based Ore Sorting Technology in Mining — Past, Present and Future // *Minerals*, 2019. Vol.9. PP.1–25
8. *Lessarda J., Sweetsera W., Bartramb K., Figueroaa J., Hugh L.* Bridging the gap: Understanding the economic impact of ore sorting on a mineral processing circuit // *Minerals Engineering*. — 2016. — Vol.91, PP.92–99

9. Nadolski S., Samuels M., Klein B., Hart C. Evaluation of bulk and particle sensor-based sorting systems for the New Afton block caving operation. // *Minerals Engineering*. — 2018. — Vol. 121. — Pp. 169–179.
10. Пат. РФ 2204517. МПК В65G47/19, В65G37/00. Перегрузочно-формирующее устройство для подачи горной массы в покусковом режиме / Канцель В. А., Канцель М. А., Мазуркевич П. А., Богусhevский Э. М. Заявл. 13.07.2001; опубл.20.05.2003
11. Пат. RU 2432206. МПК В03В 13/06. Многоканальный рентгенорадиометрический сепаратор / Канцель А. В., Мазуркевич П. А., Данилов А. В., Канцель М. А., Цуппингер А. А., Канцель В. А. Заявл. 29.04.2010; опубл.27.10.2011. Бюл.30
12. Шибаева Д. Н., Власов Б. А., Шумилов П. А., Терещенко С. В., Асанович Д. А. Выбор оптимальной конструкции транспортирующего устройства радиометрического сепаратора с применением САЕ-систем // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. — № 537. — С. 625–634
13. Терещенко С. В., Шибаева Д. Н. Повышение качественных показателей рудопотока с использованием методов предконцентрации: теория и практика // Горный журнал. — 2020. — № 9. — С. 60–65
14. Терещенко С. В., Шибаева Д. Н., Алексеева С. А. Рентгенолюминесцентная сепарация бедных апатитсодержащих руд Хибинского массива // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2019. — № 1. — С. 137–147
15. Самойлик В. Г. Специальные и комбинированные методы обогащения полезных ископаемых: учебное пособие. — Донецк: ДонНТУ, 2015. — 165 с. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Shemyakin V., Skopov S., Klimentenok G., Panov A. Theory and practice of bauxite X-ray sorting. *Light Metals*. 2015. pp. 5–10
2. Knapp H., Robben M., Dehler M., Wotruba H. X-ray transmission sorting of tungsten ore. Conference: Optical Characterization of Materials At: Karlsruhe, Germany March 2013
3. Alblooshi A., Shammout M., Ouda O., Umar Imtiaz Ahmed, WasiUl Hassan Conceptual MSW Landfill Design and Waste-To-Energy Recovery Potential for Greater Dammam Area. PMU. 2016. 99 p.
4. Korotkevich V. A., Kukharenko I. E., Dudley Frank Thomas Unique technologies for monitoring the quality and concentration of mineral raw materials. *Zoloto i tehnologii*. 2014. no. 4(26). [In Russ]
5. Korotkevich V. A., Kukharenko I. E., Belyak A. A., Korotkevich E. V. Innovative technologies and equipment in the preliminary concentration of mineral raw materials. *Dobryvayushchaya promyshlennost'*. 2017. no. 2. pp. 168–172. [In Russ]
6. A. V. Kurkov Anufrieva S. I. Sokolova V. N. Kyzdzy M. V. Cheprasov I. V. Troitsky A. V. Grishaev G. S. Kaplin A. I. Information and analytical materials: World achievements in the development of methods, techniques and technologies for processing mineral raw materials. Series: Mineral processing. Moscow: VIMS, 2020. 52 p. [In Russ]
7. Robben C., Wotruba H. Sensor. Based Ore Sorting Technology in Mining— Past, Present and Future. *Minerals*, 2019. Vol. 9. pp. 1–25.
8. Lessarda J., Sweetsera W., Bartramb K., Figueroaa J., Hugha L. Bridging the gap: Understanding the economic impact of ore sorting on a mineral processing circuit. *Minerals Engineering*. 2016. Vol. 91, pp. 92–99.
9. Nadolski S., Samuels M., Klein B., Hart C. Evaluation of bulk and particle sensor-based sorting systems for the New Afton block caving operation. *Minerals Engineering*. 2018. Vol. 121. pp. 169–179.
10. Kantsel V. A., Kantsel M. A., Mazurkevich P. A., Bogushevsky E. M. RU 2204517, 20.05.2003. [In Russ]

11. Kantsel A. V., Mazurkevich P. A., Danilov A. V., Kantsel M. A., Zuppinger A. A., Kantsel V. A. RU 2432206, 27.10.2011 [In Russ]
12. Shibaeva D. N., Vlasov B. A., Shumilov P. A., Tereshchenko S. V., Asanovich D. A. The choice of the optimal construction for a transporting device of the radiometric separator by applying CAE-systemms. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019. S37. pp. 625–634. [In Russ]
13. Tereshchenko S. V., Shibaeva D. N. Ore quality improvement by pre-concentration: Theory and practice. *Mining journal.* 2020. no. 9. pp. 60–65. [In Russ]
14. Tereshchenko S. V., Shibaeva D. N., Alekseeva S. A. Pysical-technical basis of X-ray-luminescence separation of the Khibiny poor apatit-containing ores. *Fiziko-tekhnicheskiiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh.* 2019. no.1. pp. 137–147. [In Russ]
15. Samoylik V. G. *Spetsial'nyye i kombinirovannyye metody obogashcheniya poleznykh iskopayemykh* [Special and combined methods of mineral processing]: uchebnoye posobiye. Donetsk: DonNTU, 2015. 165 p. [In Russ]

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Шибеева Дарья Николаевна*¹ – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, shibaeva_goi@mail.ru;

Терещенко Сергей Васильевич^{1,2} – докт. техн. наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, заведующий кафедрой горного дела наук о Земле и природообустройства;

*Власов Борис Андреевич*¹ – младший научный сотрудник;

*Шумилов Павел Александрович*¹ – ведущий инженер;

*Булатов Виктор Владимирович*¹ – инженер;

¹ Кольский научный центр Российской академии наук, Апатиты, Россия;

² Мурманский арктический государственный университет, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Shibaeva D. N.*¹, Cand. Sci. (Eng.), senior researcher, shibaeva_goi@mail.ru;

Tereshchenko S. V.^{1,2}, Dr. Sci. (Eng.), chief researcher, head of laboratory, head of the department of Mining, Geosciences and nature management;

*Vlasov B. A.*¹, junior researcher;

*Shumilov P. A.*¹, leading engineer;

*Bulatov V. V.*¹, engineer;

¹ Mining Institute Subdivision of the Federal Research Centre Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia;

² Murmansk Arctic State University, Russia.

Получена редакцией 27.01.2021; получена после рецензии 22.03.2021; принята к печати 10.04.2021.

Received by the editors 27.01.2021; received after the review 22.03.2021; accepted for printing 10.04.2021.

