

# Применение численного и физического моделирования при проектировании конструкции рентгенолюминесцентного сепаратора, предназначенного для разделения руд, содержащих люминесцирующие минералы

Д.Н. Шibaева✉, Б.А. Власов, П.А. Шумилов, С.В. Терещенко, В.В. Булатов

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация  
✉shibaeva\_goi@mail.ru

**Резюме:** В работе показано применение численного и физического моделирования для обоснования конструкции системы транспортирования рентгенолюминесцентного сепаратора. Инструментом численного моделирования является программный комплекс Rocky DEM, использующий в качестве математического аппарата метод дискретных элементов. Для повышения эффективности реализации процесса рентгенолюминесцентной сепарации в систему транспортирования сепаратора предложено включить дополнительный элемент – барабанный раскладчик, объединяющий в себе устройство транспортирования и исполнительный механизм. Установлено, что наилучшую загрузку ячеек барабанного раскладчика, при которой количество нескольких кусков в одной ячейке снижается не менее чем на 15%, обеспечивает транспортирующий вибропитатель с треугольным сечением профилированной части лотка по сравнению с лотком параболического сечения. Кроме того, треугольное сечение обеспечивает снижение в два раза количество кусков с вращательным движением вокруг своей оси и, соответственно, увеличение не менее чем на 5% средней скорости перемещения по лотку потока руды. Результаты моделирования работы системы транспортирования показали необходимость уменьшения высоты торцевой перегородки барабанного раскладчика между ячейками до 45 мм, что позволило исключить столкновение кусков рудной массы с перегородкой и впоследствии их движение в направлении вращения барабанного раскладчика по внешней его поверхности, а также непрогнозируемый вылет за рабочее пространство сепаратора.

**Ключевые слова:** рентгенолюминесцентный сепаратор, физическое моделирование, имитационное моделирование, система транспортирования, транспортирующий вибропитатель, барабанный раскладчик

**Для цитирования:** Шibaева Д.Н., Власов Б.А., Шумилов П.А., Терещенко С.В., Булатов В.В. Применение численного и физического моделирования при проектировании конструкции рентгенолюминесцентного сепаратора, предназначенного для разделения руд, содержащих люминесцирующие минералы. *Горная промышленность*. 2021;(6):82–88. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-6-82-88.

## Application of numerical and physical modeling in designing of an X-ray luminescence separator intended for separation of ores containing luminescent minerals

D.N. Shibaeva✉, B.A. Vlasov, P.A. Shumilov, S.V. Tereshchenko, V.V. Bulatov

Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science, Apatity, Russian Federation  
✉shibaeva\_goi@mail.ru

**Abstract:** The paper demonstrates the application of numerical and physical modeling to justify the design of the X-ray fluorescence separator's material handling system. The Rocky DEM software package is a numerical modeling tool that uses the discrete element method as a mathematical apparatus. In order to increase the efficiency of the X-ray luminescence separation, the authors suggest including an additional element in the separator's material handling system, i.e., a drum spreader that combines a handling device and an actuating mechanism. It was found out that the best loading of the drum spreader cells, in which the number of several pieces in one cell is reduced by at least 15%, is provided by a Vibrating feeder conveyor with a triangular cross-section of the profiled part of the tray compared with the tray of parabolic cross-section. In addition, the triangular section provides a double decrease in the number of pieces with rotational movement around their axes and, accordingly, an increase of at least 5% in the average velocity of the ore flow movement along the tray. The simulation of the material handling system has shown the need to reduce the height of the end partition of the drum spreader between the cells to 45 mm, which eliminates the collision of ore pieces with the partition and subsequently, their movement in the direction of rotation of the drum spreader on its outer surface, as well as the unpredictable escape of the ore pieces beyond the working space of the separator.

**Keywords:** X-ray fluorescence separator, physical modelling, simulation modelling, material handling system, conveying vibratory feeder, drum spreader

**For citation:** Shibaeva D.N., Vlasov B.A., Shumilov P.A., Tereshchenko S.V., Bulatov V.V. Application of numerical and physical modeling in designing of an X-ray luminescence separator intended for separation of ores containing luminescent minerals. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2021;(6):82–88. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-6-82-88.

## Введение

Одним из главных мировых трендов цифровизации промышленности, работы отдельных технологических линий и аппаратов является создание цифровых двойников, которые позволяют увидеть продукт, услугу или работу производства еще на этапе планирования [1]. Первым шагом к их созданию является разработка цифровой модели, обеспечивающей возможность оценки и проверки конструкторских решений, в том числе, например, при создании и совершенствовании оборудования, используемого для переработки минерального сырья.

Перспективным и на сегодняшний день не получившим достаточно широкого применения является процесс предварительного обогащения. Актуальность его использования в современных условиях вызвана растущим обеднением запасов полезных ископаемых по многим видам минерального сырья, необходимостью эксплуатации месторождений в сложных горно-геологических условиях и применением высокопроизводительного добычного оборудования, приводящего к повышению количества отходов горного производства в процессе обогащения. Технология предварительного обогащения, как правило, является мостиком между горным цехом и процессами переработки, обеспечивая повышение содержания полезного компонента (ПК) за счет выделения пустых и слабоминерализованных пород в кусковой форме. Таким образом, при её реализации происходит процесс предварительной концентрации (предконцентрации) ПК в добытой горной массе, направляемой на переработку. Одним из методов предконцентрации является рентгенолюминесцентная сепарация кусковой горной массы. С её помощью из технологического потока выделяется кусковой материал, в котором концентрируются минералы, содержащие ПК и интенсивно люминесцирующие под воздействием рентгеновского излучения. Оставшаяся часть потока представляет собой куски пустой или слабоминерализованной породы и может быть направлена в отвал или использоваться по другому назначению, например, для производства щебня.

Работы по созданию российского оборудования для разделения горной массы, содержащей люминесцирующие минералы, осуществляются НПП «Буревестник» (Санкт-Петербург). Этой организацией для АК «АЛРОСА» (ПАО) производится несколько типов рентгенолюминесцентных сепараторов (РЛС). Однако особенности возбуждения и регистрации люминесценции алмазов, примененные в разработанных моделях РЛС, не позволяют их использование на рудах, обладающих меньшей ценностью, в том числе апатитсодержащих рудах Кольского полуострова (месторождения Хибинского и Ковдорского массивов). Российским производителем РЛС, используемых для предконцентрации массивных, полосчатых и вкрапленных руд, является фирма ООО «ЭГОНТ» (Санкт-Петербург). По результатам опытно-промышленных испытаний технологии РЛС [2], проведенных с применением данного сепаратора на апатит-содержащих рудах Хибинского массива, были выявлены его недостатки и определены пути повышения

эффективности разделения, а именно необходимость разработки новой концепции модели РЛС, основанной на:

- совершенствовании системы транспортирования рудной массы через зону облучения и регистрации;
- разработке метода и конструкции, обеспечивающих минимизацию расстояния между исследуемой поверхностью куска рудной массы и устройствами облучения и детектирования, а также между зоной облучения и регистрацией и исполнительным механизмом.

## Элементы системы транспортирования концептуальной модели рентгенолюминесцентного сепаратора

Систему транспортирования разрабатываемой концептуальной модели рентгенолюминесцентного сепаратора, предназначенного для разделения рудной массы класса крупности  $-50+20$  мм, можно условно разделить на две части:

- первая часть представлена двумя вибропитателями: разгрузочным и транспортирующим;
- вторая часть – барабанным раскладчиком.

Лоток разгрузочного вибропитателя имеет плоский профиль и используется для разгрузки рудной массы из приемного бункера и ее равномерной подачи на транспортирующий вибропитатель. Второй вибропитатель – транспортирующий, формирует последовательное движение кусков в зону облучения и регистрации светового потока люминесценции от минералов, содержащих ПК, для реализации покускового режима измерения. Литературный и патентный обзор применяемых в радиометрических сепараторах устройств транспортирования, реализующих перемещения рудной массы от приемного бункера в зону облучения и регистрации, выявил две основные геометрические формы лотка транспортирующего вибропитателя – параболического и треугольного сечения его профилированной части<sup>1</sup> [3–13]. В работе [14] показана эффективность перехода с U-образного лотка на лоток V-образной формы рентгенорадиометрического сепаратора, используемого для обогащения алмазосодержащих продуктов крупностью  $-6+3$  мм, однако обоснование целесообразности такого перехода не приведено.

В качестве прототипа для создания трехмерной и физической модели транспортирующего вибропитателя (рис. 1, а) использовался транспортирующий вибропитатель с параболической формой канала лотка, применяемый в энергодисперсионном флуоресцентном сепараторе, разрабо-

<sup>1</sup> Tomra's mineral and ore sorting equipment for more profit. Available at: <https://www.tomra.com/ru-ru/sorting/mining/>

Solutions especially for the requirements in mining. Available at: <https://redwave.com/en/solutions/mining>

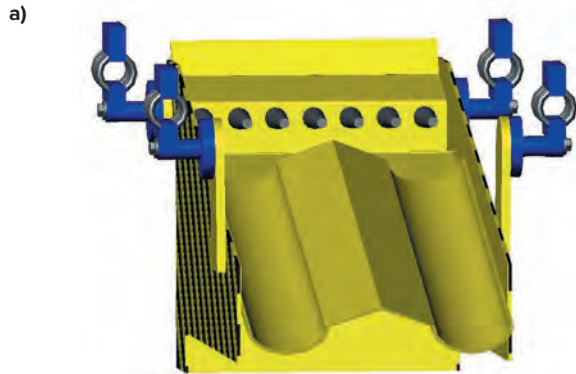
Use ore sorting equipment to concentrate ores and cut process costs. Available at: <https://steinertglobal.com/mining/ore-sorting/>

State-of-the-art-technology in ore mining. Available at: [https://www.at-minerals.com/en/artikel/State-of-The-Art-Technology\\_in\\_Ore\\_Mining\\_1852781.html](https://www.at-minerals.com/en/artikel/State-of-The-Art-Technology_in_Ore_Mining_1852781.html) (Accessed:31.08.2021)

Экологические горные обогатительные новые технологии. Available at: <http://www.egont.ru>

Ore sorting: the road to optimizing your operation. Available at: <https://www.mogroup.com/insights/blog/mining-and-metals/ore-sorting-the-road-to-optimizing-your-operation/>

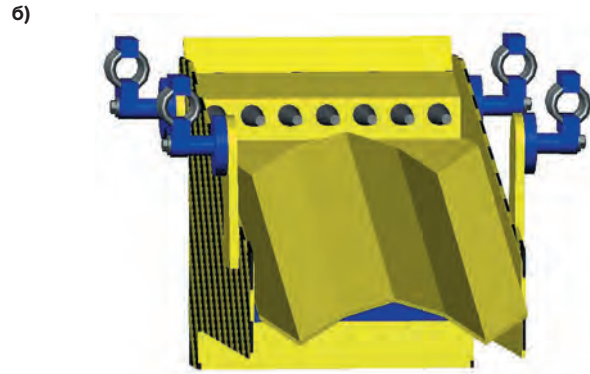
танном и изготовленном фирмой ООО «РАДОС». Данный вибропитатель дополнительно оснащен колосниковым грохотом, обеспечивающим выделение мелкой фракции (руды крупностью менее машинного класса для данной модели сепаратора), образовавшейся в результате перемещения рудной массы. Для апатит-нефелиновых руд месторождений Хибинского массива рудная мелочь крупностью менее 20 мм характеризуется повышенным содержанием полезного компонента и присоединяется к обогащенному продукту рентгенолюминесцентной сепарации [2].



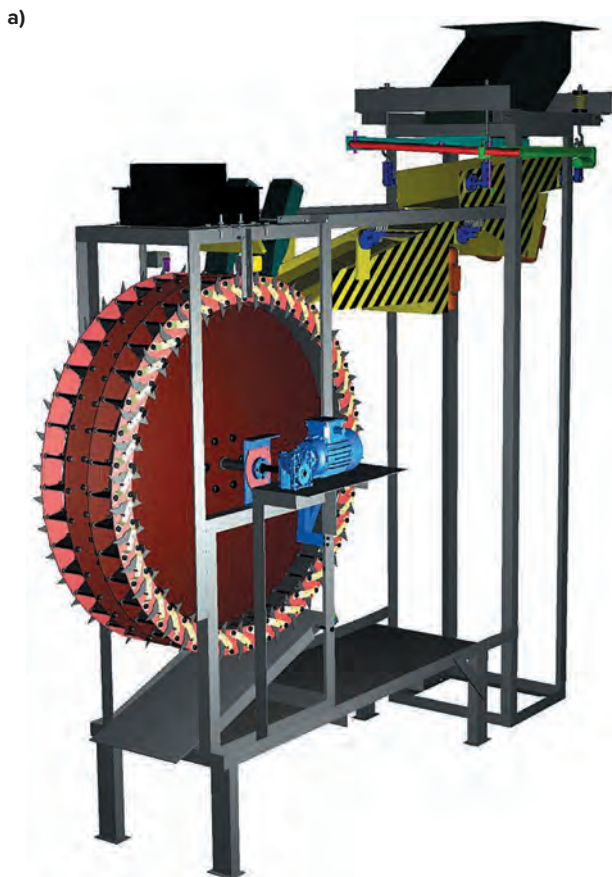
**Рис. 1**  
Лоток транспортирующего вибропитателя: а – с параболическим сечением профилированной части; б – с треугольным сечением профилированной части

По его образцу разработан лоток с треугольным сечением профилированной части (рис. 1, б). Основные параметры обоих лотков, а именно их массы, длины профилированной части каналов, ширина и глубина каналов совпадают.

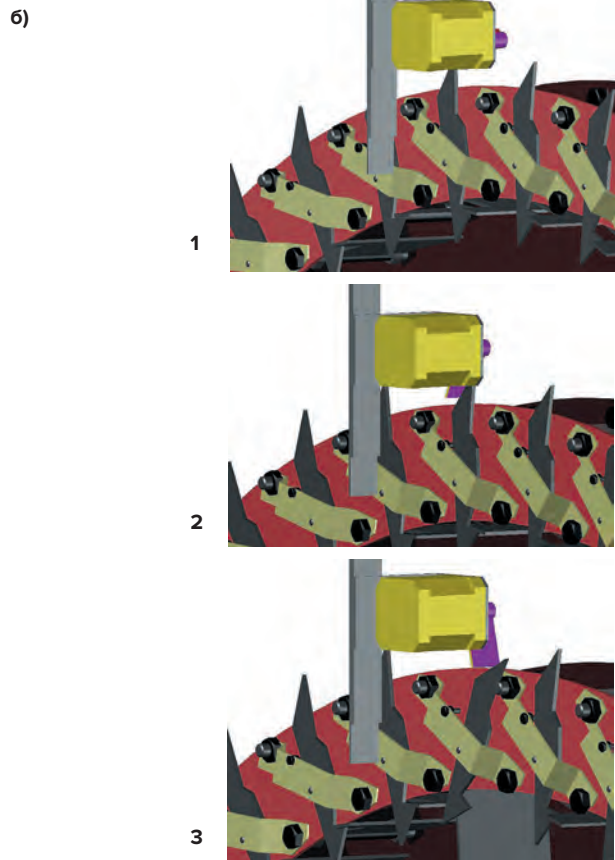
Уникальность конструкции системы транспортирования рентгенолюминесцентного сепаратора заключается в барабанном раскладчике (рис. 2), объединяющем в единую систему устройство транспортирования рудной массы в зону облучения и регистрации, и исполнительный меха-



**Fig. 1**  
Vibrating feeder conveyor tray: а – with the parabolic section of the profiled part; б – with the triangular section of the profiled part



**Рис. 2**  
Барабанный раскладчик в САПР AutoCAD: а – общий вид; б – последовательное открытие дна ячейки: 1 – исходное положение флажка исполнительного механизма, 2 – начало взаимодействия флажка исполнительного механизма с фиксатором дна ячейки, 3 – отклонение флажком исполнительного механизма фиксатора дна ячейки (открытие дна ячейки)



**Fig. 2**  
Drum spreader in AutoCAD: а – general view; б – sequential opening of the cell bottom: 1 – initial position of the executive mechanism actuator flag, 2 – start of interaction between the actuator flag and the lock of the cell bottom, 3 – deflection of cell bottom lock by the actuator flag (opening of the cell bottom)

низм, выделяющий из технологического потока горной массы куски, содержащие полезные компоненты.

Предлагаемое устройство, интегрированное в систему транспортирования рентгенолюминесцентного сепаратора, обеспечивает фиксированное расстояние от поверхности куска до источника первичного излучения и детектора и высокую эффективность разделения – все зарегистрированные куски, содержащие полезные компоненты, значение интенсивности люминесценции которых превышает заданное пороговое значение, попадают в обогащенный продукт сепарации. Декларируемая эффективность разделения обеспечивается за счет наличия у ячейки барабанного раскладчика подвижного дна, выполненного в виде откидывающейся пластины с двумя фиксированными положениями, закрытом – в зоне облучения и открытом – в зоне выделения полезных кусков в концентрат. Исполнительным механизмом каждой ячейки является подвижный фиксатор, удерживающий откидывающуюся пластину в закрытом положении в зоне облучения и освобождающий ее от фиксации в зоне разделения.

### Моделирование в программном комплексе Rocky DEM

В качестве инструмента моделирования применен программный комплекс Rocky DEM – современный инструмент для моделирования динамики сыпучих сред со сложной геометрией частиц методом дискретных элементов (DEM). Возможности данного продукта позволяют моделировать несферические частицы и задавать неоднородный гранулометрический состав, рассчитывать взаимодействие частиц с оборудованием со сложным движением, обеспечивая тем самым близость к реальному объекту моделирования – сепарируемой рудной массе. В работе [15] представлен пример успешного применения программного комплекса Rocky DEM для моделирования процесса измельчения горных пород в щековой дробилке.

В САПР AutoCAD была создана трехмерная модель опытного образца рентгенолюминесцентного сепаратора, импортированная в Rocky DEM для моделирования процесса перемещения рудной массы в зону облучения и регистрации по устройствам системы транспортирования с целью выбора их оптимальной конструкции, а также определения наилучших параметров их совместной работы.

В качестве начальных условий моделирования в программном комплексе Rocky DEM заданы:

- силы, действующие на кусок рудной массы при его движении по лотку вибропитателя (сила тяжести, импульс от колебания лотка, сила трения), и взаимодействие кусков между собой и поверхностью лотка;

- форма, крупность, плотность кусков рудной массы, и ее фракционный состав, определенные по результатам детального изучения реальной пробы апатитсодержащей руды одного из Хибинских месторождений класса крупности –50+20 мм;

- параметры работы вибропитателей.

Работа вибропитателей в кинематической модели определена на основе установленной зависимости частоты, регулируемой на пульте управления вибропитателями и фактической частотой их колебаний, измерения смещения реперной точки лотка вибропитателя вдоль оси абсцисс и оси ординат.

Подбор оптимальных характеристик работы элементов системы транспортирования кусков рудной массы в зону облучения и регистрации (режимов подачи руды, рабо-

ты разгрузочного и транспортирующего вибропитателей, скорости вращения барабанного раскладчика), обеспечивающих разгрузку бункера с рудой без образования навала, равномерную загрузку транспортирующего вибропитателя, однорядное движение кусков друг за другом по его поверхности, реализован с применением итерационного метода.

С целью повышения адекватности имитационного моделирования проведены параллельные физические эксперименты на концептуальной модели РЛС. Оценка результатов физического моделирования процесса перемещения рудной массы из приемного бункера сепаратора в зону облучения и регистрации основана на анализе видеозаписей в видеоредакторе Adobe Premier Pro CC. Анализ видеозаписей позволил определить факторы, влияющие на движение кусков по лотку, построить траектории их движения, получить скорость движения каждого куска и рассчитать среднюю скорость потока, выявить элементы конструкции, требующие доработки.

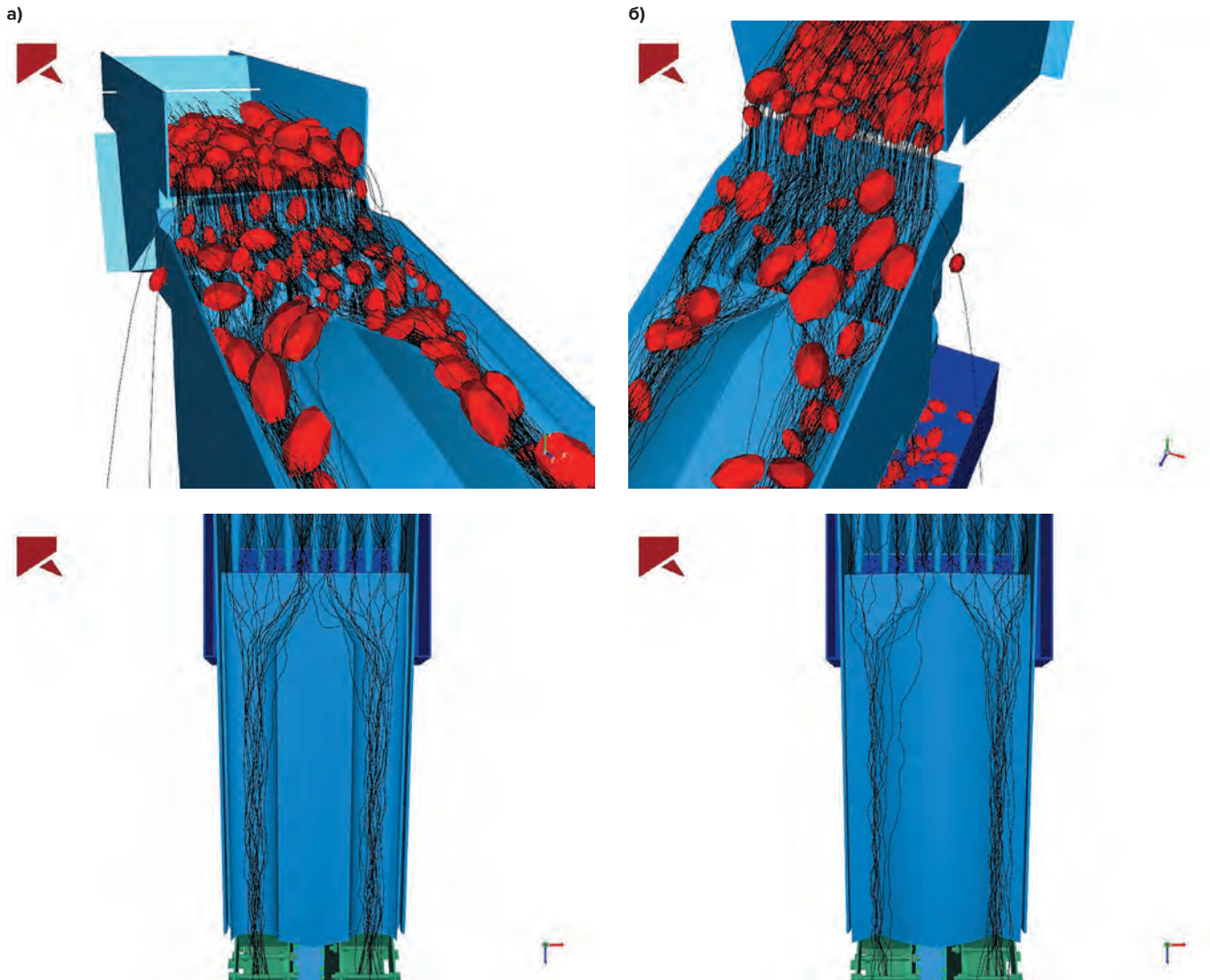
### Сравнительный анализ конструкций систем транспортирования в концептуальной модели рентгенолюминесцентного сепаратора

Проведенная ранее оценка влияния геометрии канала лотка транспортирующего вибропитателя на характер движения кусков по его поверхности с применением аналитического моделирования [16] показала преимущество треугольной формы канала, поскольку траектория движения куска по наклонному лотку параболического профиля демонстрирует криволинейный маятниковый характер движения тела с амплитудой, затухающей только к концу лотка, а для треугольной формы канала, вследствие наличия ограничений вертикального перемещения его бортами, уже к середине лотка формируется близкая к прямолинейной траектория движения.

Анализ перемещения кусков рудной массы по поверхности транспортирующих вибропитателей с параболическим и треугольным сечениями профилированной части лотка в программном комплексе Rocky DEM (рис. 3) подтвердил полученные в результате аналитического моделирования выводы. Формирование однорядного потока кусков, движущихся по поверхности лотка транспортирующего вибропитателя треугольного сечения по траектории, близкой к прямолинейной, сопровождается увеличением средней скорости движения кусков в потоке не менее чем на 5% по отношению к средней скорости движения кусков в потоке по лотку параболического профиля.

Изучение перемещения реальных кусков рудной массы крупностью –50+20 мм в концептуальной модели РЛС (физическое моделирование) выявило основные характеры движения кусков: прямолинейное движение, перекачивание куска, вращение куска вокруг собственной оси и их комбинации: вращение куска вокруг своей оси с последующим прямолинейным движением, перекачивание куска с последующим прямолинейным движением, перекачивание куска с последующим вращением вокруг своей оси и прямолинейным движением. Анализ узких диапазонов крупности (с шагом 10 мм) и формы кусков, определяющейся отношением длины куска к ширине, не выявил влияния размера на характер движения кусков руды в диапазоне крупности –50+20 мм.

При движении по поверхности канала лотка параболического сечения наблюдается двукратное увеличение количества кусков с криволинейным характером их движения,



**Рис. 3**  
 Движение кусков рудной массы по поверхности вибропитателей:  
 а – система транспортирования параболическим сечением профилированной части лотка ВП;  
 б – треугольным сечением

**Fig. 3**  
 Movement of the ore lumps along the surface of the vibrating feeder:  
 а – handling system with the parabolic cross-section of the profiled part of the vibrating feeder tray;  
 б – with the triangular cross-section

а именно с вращением вокруг своей оси, по сравнению с каналом лотка треугольного сечения (27 и 14% соответственно для параболического и треугольного сечений). Отмечено, что при движении по лотку треугольного профиля преимущественно вращаются куски с соотношением длины к ширине равной 1,0:1,5 (близкие к округлой форме) – 70%, по параболическому профилю таких кусков менее половины – 45%. Представленные данные объясняют причины снижения средней скорости движения кусков в потоке по транспортирующему вибропитателю с лотком параболического сечения его профилированной части.

В ходе проведения сравнительных исследований влияния скорости и характера перемещения кусков рудной массы по поверхности лотка транспортирующего вибропитателя с различной формой сечения профилированной части выявлено негативное влияние высоты торцевой перегородки ячейки барабанного раскладчика на укладку кусков в ячейки, а именно столкновение кусков рудной массы с перегородкой и последующее их движение в направлении вращения барабанного раскладчика по внешней его поверхности, а также непрогнозируемый вылет за рабочее

пространство сепаратора. Для устранения этого недостатка в САПР AutoCAD разработаны различные варианты высоты торцевой перегородки.

Результаты имитационного и физического моделирования, свидетельствующие об общих трендах, схожем поведении кусков рудной массы в пространстве реального сепаратора и его трехмерной модели, позволили исключить временные и материальные затраты на изготовление и замену ячеек с перегородками различной высоты для опытного образца сепаратора и выбрать оптимальную высоту торцевой перегородки между ячейками на основе только имитационного моделирования в программном комплексе Rocky DEM. Установлено, что достаточной высотой, при которой отсутствует вылет кусков из ячеек, является высота торцевой перегородки равная 45 мм.

Дальнейшее последовательное уменьшение высоты торцевой перегородки до 35 мм для параболического сечения лотка транспортирующего вибропитателя привело к увеличению количества кусков, попавших в одну ячейку, для треугольной формы сечения профилированной части лотка характерна тенденция снижения попадания несколь-

ких кусков в одну ячейку. Необходимо отметить, что при загрузке барабанного раскладчика вибропитателем с треугольной формой сечения профилированной части лотка количество случаев попадания нескольких кусков в одну ячейку снижается не менее чем на 15%, что свидетельствует о преимуществе данной формы сечения канала.

### Заключение

Анализ результатов процесса перемещения рудной массы класса крупности –50+20 мм из приемного бункера в зону облучения и регистрации по устройствам системы транспортирования, полученных при проведении экспериментов на реальном образце концептуальной модели РЛС (физическое моделирование) и на его трехмерной кинематической модели в Rocky DEM (имитационное моделирование), позволил определить лучший вариант конструкции устройств данной системы. Необходимо отметить, что проведение параллельных опытов в модели и на образце концептуальной модели РЛС позволяет повышать точность прогнозных результатов и снижать количество экспериментов на большеобъемных пробах. Установлено, что применение треугольной формы сечения профилированной части лотка транспортирующего вибропитателя по сравнению с параболической формой сечения обеспечивает:

– снижение в два раза количества кусков с вращательным движением вокруг своей оси и, соответственно, увеличение средней скорости потока руды не менее чем на 5%;

– скорейшее выравнивание траектории движения кусков относительно центральной оси канала: более половины лотка куски движутся по траектории, близкой к прямолинейной, тогда как на параболе эта траектория формируется ближе к концу лотка;

– наилучшую загрузку ячеек барабанного раскладчика, при которой количество случаев попадания нескольких кусков в одну ячейку снижается не менее чем на 15%.

Полученные результаты имитационного и физического моделирования, свидетельствующие об общих трендах, схожем поведении кусков рудной массы в пространстве реального сепаратора и его трехмерной модели, позволили исключить временные и материальные затраты на изготовление и замену ячеек с перегородками различной высоты для опытного образца концептуальной модели РЛС и определить по результатам только имитационного моделирования достаточную высоту торцевой перегородки между ячейками до 45 мм, которая позволила исключить столкновение кусков рудной массы с перегородкой и впоследствии их движение в направлении вращения барабанного раскладчика по внешней его поверхности, а также непрогнозируемый вылет за рабочее пространство сепаратора.

### Список литературы

1. Курганова Н.В., Филин М.А., Черняев Д.С., Шаклеин А.Г., Намиот Д.Е. Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства. *International Journal of Open Information Technologies*. 2019;7(5):105–115. Режим доступа: <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/748>
2. Tereshchenko S.V., Shibaeva D.N., Alekseeva S.A. X-ray luminescence separation of Khibiny low-grade apatite ore. *Journal of Mining Science*. 2019;55(1):124–133. <https://doi.org/10.1134/S1062739119015371>
3. 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;121:169–179. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.02.004>
4. Lessard J., Sweetser W., Bartram K., Figueroa J., McHugh L. Bridging the gap: Understanding the economic impact of ore sorting on a mineral processing circuit. *Minerals Engineering*. 2016;91:92–99. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.08.019>
5. Коновалов Г.Н., Наумов М.Е. Способ кусковой сепарации руд. 2014. Патент RU2569528 С1. МПК В03В 13/06(2006.01), В07С 5/34(2006.01), 27.11.2015. Бюл. № 33.
6. Ballantyne G.R., Hilden M., Bartram K., Souto V. *Characterising energy efficiency of particle sorting*. 2018. Available at: <https://www.ceecthefuture.org/resources/characterising-energy-efficiency-of-particle-sorting> (Accessed: 31.08.2021).
7. Канцель В.А., Канцель М.А., Мазуркевич П.А., Богушевский Э.М. *Перегрузочно-формирующее устройство для подачи горной массы в покусковом режиме*. 2001. Патент РФ 2204517. МПК В65G47/19, В65G37/00, 20.05.2003
8. Канцель А.В., Данилов А.В., Цуппингер А.А., Мазуркевич П.А., Канцель М.А., Канцель В.А. *Рудосепарационный модуль*. 2010. Патент RU 2422210. МПК В03В 13/06, В07С 5/34, 27.06.2011
9. Baala D., Idres A., Bounouala M., Benselhoub A. Radiometric sorting techniques for mining wastes from Ouenza iron mine (Algeria). *Науковий Вісник Національного Гірничого університету*. 2018;(5):30–38. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/3>
10. Azaryan V. The methodology of use of the mobile crushing-and-sorting radiometric complex in the iron-ore pit. *Solid State Phenomena*. 2018;277:90–99. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.277.90>
11. Burdakova E.A., Bragin V.I., Usmanova N.F., Vashlaev A.O., D'yachenko L.E., Lesnikova L.S., Fertikov A.I. Radiometric separation in grinding circuit of copper-nickel ore processing. *Journal of Mining Science*. 2019;55(5):824–831. <https://doi.org/10.1134/S1062739119056197>
12. von Ketelhodt L., Bergmann C. Dual energy X-ray transmission sorting of coal. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2010;110(7):371–378.
13. Robben C., Condori P., Pinto A., Machaca R., Takala A. X-ray-transmission based ore sorting at the San Rafael tin mine. *Minerals Engineering*. 2020;145:105870. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105870>
14. Рахмеев Р.Н. *Разработка технологии рентгенорадиометрической сепарации алмазосодержащих концентратов: дис. ... канд. техн. наук*. Иркутск, 2018. 113 с.
15. Белоглазов И.И., Иконников Д.А. Применение метода дискретных элементов для моделирования процесса измельчения горных пород в щековой дробилке. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2016;59(9):780–786. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2016-59-9-780-786>
16. Tereshchenko S.V., Shibaeva D.N., Shumilov P.A., Vlasov B.A. Effect of vibrating feeder pan geometry on radiometric separator performance. *Eurasian Mining*. 2020;(2):39–42. <https://doi.org/10.17580/em.2020.02.09>

**References**

1. Kurganova N.V., Filin M.A., Cherniaev D.S., Shaklein A.G., Namiot D.E. Digital twins' introduction as one of the major directions of industrial digitalization. *International Journal of Open Information Technologies*. 2019;7(5):105–115. (In Russ.) Available at: <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/748>
2. Tereshchenko S.V., Shibaeva D.N., Alekseeva S.A. X-ray luminescence separation of Khibiny low-grade apatite ore. *Journal of Mining Science*. 2019;55(1):124–133. <https://doi.org/10.1134/S1062739119015371>
3. 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;121:169–179. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.02.004>
4. Lessard J., Sweetser W., Bartram K., Figueroa J., McHugh L. Bridging the gap: Understanding the economic impact of ore sorting on a mineral processing circuit. *Minerals Engineering*. 2016;91:92–99. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.08.019>
5. Konovalov G.N., Naumov M.E. *Lump ore separation method*. 2014. Patent RU2569528 C1. 27.11.2015 (In Russ.)
6. Ballantyne G.R., Hilden M., Bartram K., Souto V. *Characterising energy efficiency of particle sorting*. 2018. Available at: <https://www.ceecthefuture.org/resources/characterising-energy-efficiency-of-particle-sorting> (Accessed: 31.08.2021).
7. Kantsel V.A., Kantsel M.A., Mazurkevich P.A., Bogushevsky E.M. *Reloading-forming device to feed the rock mass in the lump-wise mode*. 2001. Patent Russian Federation 2204517. МПК B65G47/19, B65G37/00, 20.05.2003 (In Russ.)
8. Kantsel' A.V., Danilov A.V., Tsuppingier A.A., Mazurkevich P.A., Kantsel M.A., Kantsel V.A. *Ore separation module*. 2010. Patent RU 2422210. МПК B03B 13/06, B07C 5/34, 27.06.2011
9. Baala D., Idres A., Bounouala M., Bensehoul A. Radiometric sorting techniques for mining wastes from Ouenza iron mine (Algeria). *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2018;(5):30–38. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/3>
10. Azaryan V. The methodology of use of the mobile crushing-and-sorting radiometric complex in the iron-ore pit. *Solid State Phenomena*. 2018;277:90–99. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.277.90>
11. Burdakova E.A., Bragin V.I., Usmanova N.F., Vashlaev A.O., D'yachenko L.E., Lesnikova L.S., Fertikov A.I. Radiometric separation in grinding circuit of copper-nickel ore processing. *Journal of Mining Science*. 2019;55(5):824–831. <https://doi.org/10.1134/S1062739119056197>
12. von Ketelhodt L., Bergmann C. Dual energy X-ray transmission sorting of coal. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2010;110(7):371–378.
13. Robben C., Condori P., Pinto A., Machaca R., Takala A. X-ray-transmission based ore sorting at the San Rafael tin mine. *Minerals Engineering*. 2020;145:105870. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105870>
14. Rakhmiev R.N. *Development of the X-ray radiometric separation technology for diamond-containing concentrates: Dissertation for the Candidate of Technical Sciences Degree (PhD in Engineering)*. Irkutsk, 2018. 113 p. (In Russ.)
15. Beloglazov I. I., Ikonnikov D. A. Application of the discrete element method for modeling of rocks crushing in a jaw crusher. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie = Journal of Instrument Engineering*. 2016;59(9):780–786. (In Russ.) <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2016-59-9-780-786>
16. Tereshchenko S.V., Shibaeva D.N., Shumilov P.A., Vlasov B.A. Effect of vibrating feeder pan geometry on radiometric separator performance. *Eurasian Mining*. 2020;(2):39–42. <https://doi.org/10.17580/em.2020.02.09>

**Информация об авторах**

**Шibaева Дарья Николаевна** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3974-0140>, e-mail: [shibaeva\\_goi@mail.ru](mailto:shibaeva_goi@mail.ru)

**Власов Борис Андреевич** – младший научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

**Шумилов Павел Александрович** – ведущий инженер, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7995-2092>

**Терещенко Сергей Васильевич** – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6068-4235>

**Булатов Виктор Владимирович** – инженер, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 03.11.2021  
 Поступила после рецензирования: 24.11.2021  
 Принята к публикации: 25.11.2021

**Information about the authors**

**Daria N. Shibaeva** – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science, Apatity, Russian Federation; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3974-0140>, e-mail: [shibaeva\\_goi@mail.ru](mailto:shibaeva_goi@mail.ru)

**Boris A. Vlasov** – Junior Researcher, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science, Apatity, Russian Federation

**Pavel A. Shumilov** – Leading Engineer, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science, Apatity, Russian Federation; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7995-2092>

**Sergey V. Tereshchenko** – Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science, Apatity, Russian Federation; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6068-4235>

**Viktor V. Bulatov** – Engineer, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science, Apatity, Russian Federation

**Article info**

Received: 03.11.2021  
 Revised: 24.11.2021  
 Accepted: 25.11.2021