

Шибеева Дарья Николаевна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, **Шумилов Павел Александрович**, научный сотрудник, **Булатов Виктор Владимирович**, инженер, **Терещенко Сергей Васильевич**, доктор техн. наук, руководитель лаборатории.

Горный институт КНЦ РАН, 184209, Россия, г. Апатиты, ул. Ферсмана 24

E-mail: shibaeva_goi@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЧНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИММИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация: В статье структурированы факторы, оказывающие влияние на производительность радиометрических сепараторов. Приведены примеры существующих образцов российского и зарубежного сортировочного оборудования. Разработан макетный стенд, моделирующий работу основных узлов радиометрического сепаратора. Описаны основные принципы для имитации движения транспортирующего устройства и контролирующих его датчиков, формирования потока сигналов вторичного излучения с поверхности исследуемого образца и его регистрацию фотоприемником, работы устройства визуализации уровня зарегистрированного сигнала и устройства обработки и выработки управляющего сигнала на исполнительный механизм. Проведена оценка скорости обработки зарегистрированного потока вторичного излучения с поверхности исследуемого образца и выработки команды на исполнительный механизм. Проанализирован полученный результат времени прохождения куска рудной массы через зону облучения и регистрации для апатитсодержащих руд Хибинского массива. Установлено, что регистрация интенсивности люминесценции апатита за время равное 2 мс является достаточным условием для его эффективного выделения из минеральной смеси. Рассчитано граничное значение производительности люминесцентного сепаратора равное 119,2 т/ч.

Ключевые слова: радиометрический сепаратор, производительность радиометрического сепаратора, моделирование, микроконтроллеры, скорость обработки сигналов, апатитсодержащие руды, кинетика люминесценции.

Информация о статье: принята 01 июня 2019 г.
DOI: 10.26730/1816-4528-2019-2-39-45

Минерально-сырьевая база России является одним из её основных стратегических потенциалов. Состояние и качество твердых полезных ископаемых постоянно изменяются, и характер этих изменений зачастую носит отрицательную динамику, характеризующуюся увеличением объемов рудной массы с низким содержанием полезного компонента, обусловленным геолого-структурными особенностями месторождений и применяемой технологией отработки запасов, сопровождающейся включением в добытую рудную массу больших объемов разубоживающих пород. Переработка такой руды требует совершенствования подходов к рудоподготовке - использования процесса предконцентрации посредством автоматизированных устройств и систем, обеспечивающих высокую информативность и достоверность данных о качестве разделяемого кускового материала.

Реализация процесса предконцентрации добытой рудной массы, использующего информационные методы, осуществляется в радиометрических сепараторах [1-12]. Эти устройства позволяют получать информацию о содержании полезных компонентов в кусковом материале горных пород при взаимодействии с ним различных видов излучений. В результате такого взаимодействия возникает

вторичное излучение, соответствующее некоторому физическому явлению, например, люминесценции, световой поток которой преобразуется специальными устройствами - детекторами - в электрические сигналы, являющиеся индивидуальной характеристикой каждого конкретного образца горной породы.

Поскольку спрос на продукцию горных предприятий остается на прежнем уровне, то в условиях снижения качества извлекаемых запасов для обеспечения потребностей общества необходимо добывать и перерабатывать большее количество горной массы. Решением задачи снижения себестоимости получения конечной продукции при нарастающих объемах руды, поступающей на обогащение, является включение процессов предконцентрации с использованием радиометрических сепараторов, обладающих высокой производительностью, которая определяется рядом факторов, разделенных на две группы:

первая группа связана со свойствами минерального сырья:

- временем развития физического явления в сепарируемых кусках рудной массы;
 - крупностью разделяемого материала;
- вторая группа* обусловлена конструктивными особенностями сепаратора:

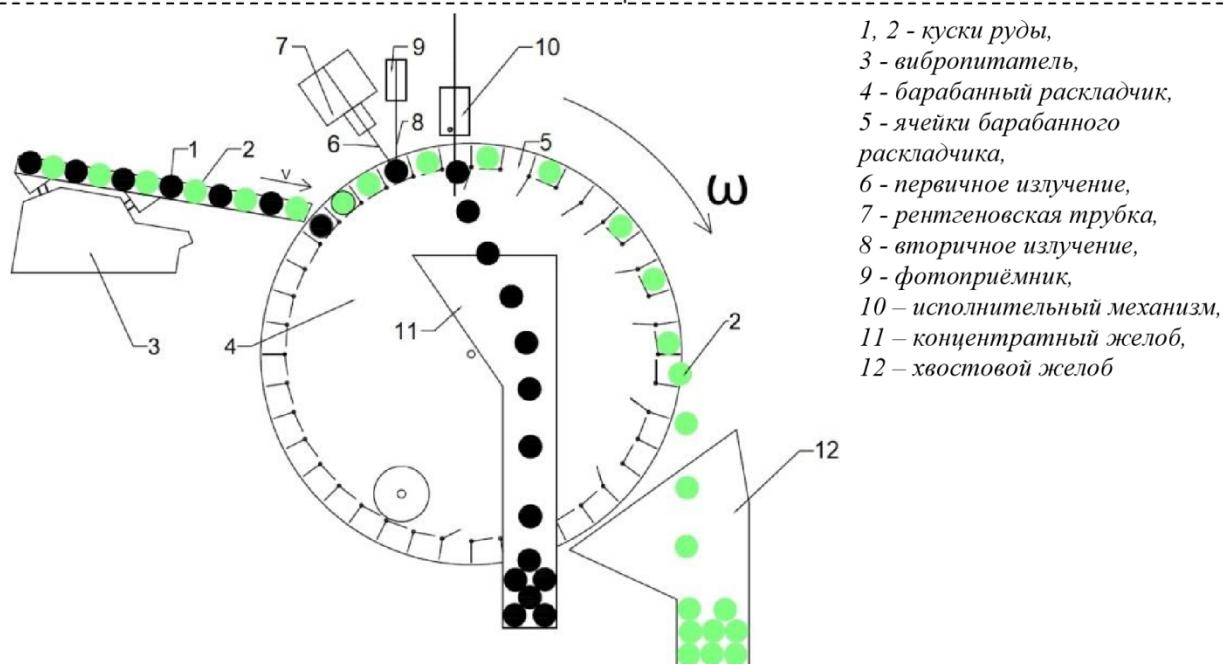


Рис.1. Схема радиометрического сепаратора

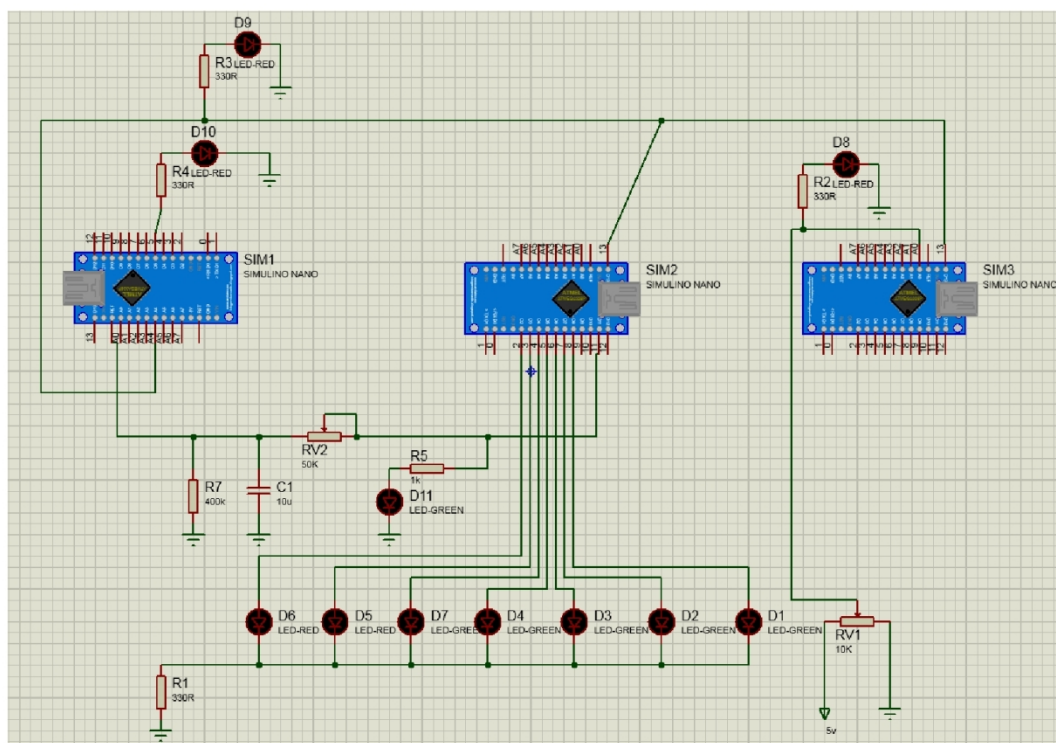


Рис.2. Принципиальная электронная схема, моделирующая работу люминесцентного сепаратора

- шириной зоны облучения и регистрации, определяющей плотность потока кусков (минимальное расстояние между кусками рудной массы, следующими друг за другом);
- скоростью подачи кусков рудной массы в зону облучения и регистрации;
- скоростью работы исполнительных механизмов, непосредственно реализующих процесс разделения (например, электропневмоклапаны, шиберы);
- скоростью обработки зарегистрированных сигналов.

Целью данной работы является оценка предельных возможностей блока обработки регистрируемых сигналов с поверхности исследуемых образцов и выработки управляющих решений с учетом времени развития физического явления в сепарируемых кусках, например, апатитовых руд Хибин, кинетическими характеристиками рентгенолюминесценции апатита.

В качестве моделируемого устройства принят люминесцентный сепаратор [13], схема которого представлена на рисунке 1. Разработанный макетный стенд, моделирующий его работу, позволит

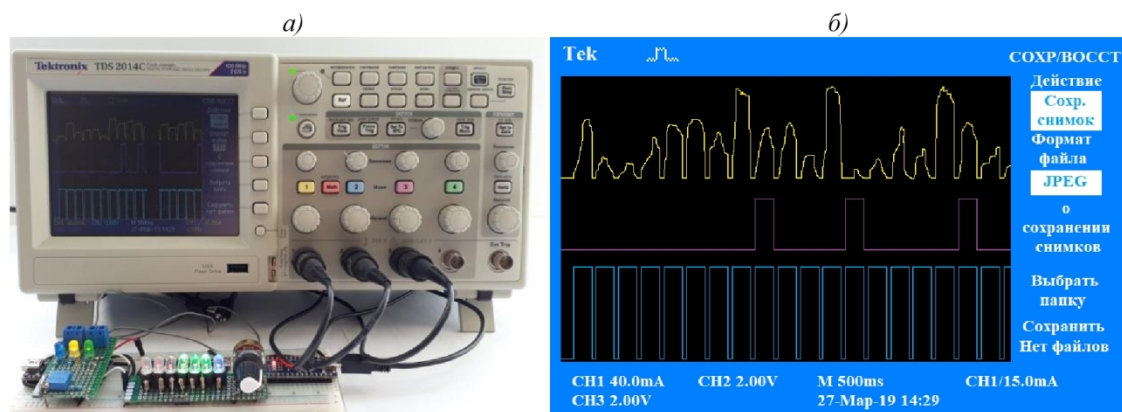


Рис.3. Иллюстрация работы моделирующего устройства: а) подключение макетного стенда к осциллографу, б) экран осциллографа

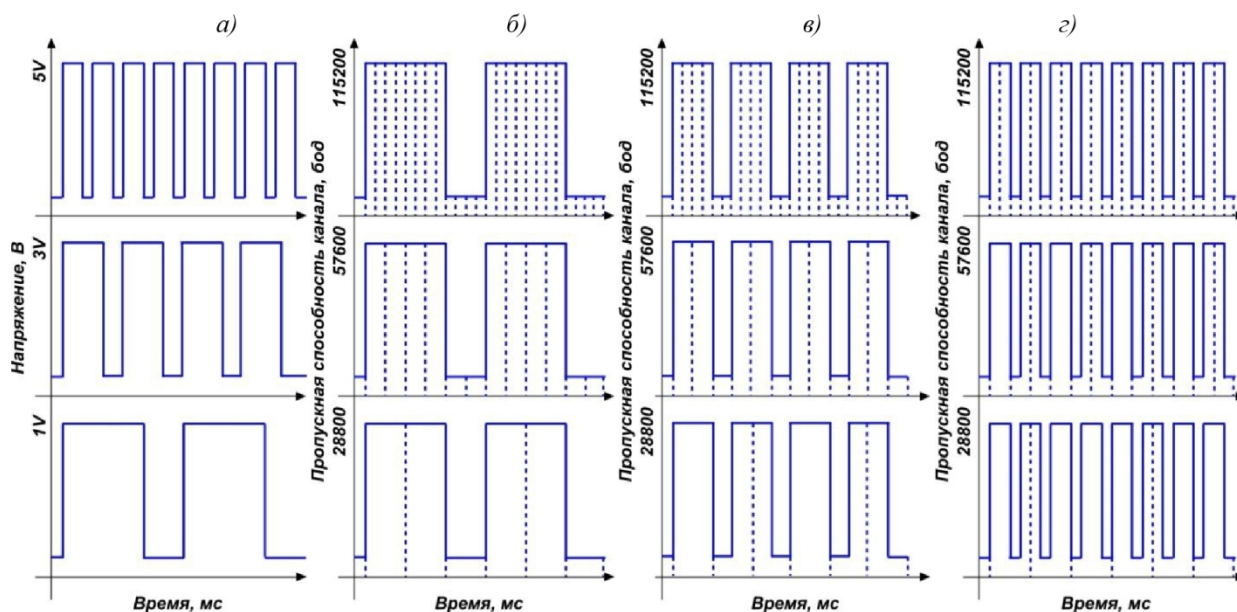


Рис.4. График генерируемых сигналов барабанного раскладчика:

а) изменение скорости вращения барабанного раскладчика; изменение пропускной способности канала при напряжении б) 1V, в) 3V, г) 5V

определить скоростные возможности блока обработки информации.

На рисунке 2 представлена принципиальная электронная схема макетного стенда. Первые два блока имитируют работу транспортирующего устройства (4), предназначенного для перемещения кусков рудной массы в зону облучения и регистрации, и устройства детектирования (фотоприемника (9), регистрирующего поток вторичного излучения с поверхности исследуемых образцов различного вещественного состава.

Вращение барабанного раскладчика (4) моделируется на микроконтроллере SIM3, скорость определяется величиной напряжения, изменяющейся в диапазоне от 0 до 5V. Интенсивность свечения светодиода D8 характеризует уровень поданного на микроконтроллер напряжения. Контроль скорости вращения барабанного раскладчика осуществляется с помощью датчиков движения, отслеживающих границы ячеек (5). Программный модуль, загруженный в микроконтроллер SIM3, генерирует

прямоугольный сигнал, характеризующий начало и конец каждой ячейки.

За моделирование потока вторичного излучения (8) с поверхности исследуемого образца отвечает микроконтроллер SIM2, генерирующий случайный сигнал, длительность которого определяется данными, поступившими с микроконтроллера SIM3. Моделируемый сигнал подвергается широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с изменяющейся скважностью импульсов, при соблюдении постоянной частоты сигнала. На выходе RC-фильтра значение регистрируемого аналогового ШИМ-сигнала находится в диапазоне от 0 до 5V.

Работа третьего блока – блока обработки информации и выработки на исполнительный механизм (10) управляющего решения моделируется на микроконтроллере SIM1. Применяемые алгоритмы обработки информации аналогичны алгоритмам, используемым в опытном образце люминесцентного сепаратора, схема которого представлена на рисунке 1.

Выработка сигнала срабатывания исполнительного механизма на кусок рудной массы (отсечки) реализуется на основе данных, поступивших с микроконтроллеров SIM2 и SIM3. Для контроля работы исполнительного механизма на кусок, зарегистрированное значение вторичного излучения которого превышает заданный порог разделения, создана система индикации - линейка светодиодов D1-D7. Светодиоды зеленого цвета соответствуют генерируемому значению сигнала люминесценции ниже порогового значения, красные - выше.

Подключение к разработанному стенду осциллографа позволяет наблюдать генерируемые сигналы (рис. 3, а). Нижний график (голубой) на рисунке 3, б характеризует движение барабанного раскладчика, отображая границы ячеек, средний график (фиолетовый) иллюстрирует работу исполнительного механизма, верхний график (желтый) соответствует зарегистрированному вторичному излучению с поверхности исследуемого образца. На среднем графике рисунка 3, б наблюдается смещение на одну ячейку срабатывания исполнительного механизма, поскольку узлы блока облучения и регистрации (рентгеновская трубка 7 и фотоприемник 9) и исполнительный механизм (10) разнесены по расстоянию.

Оценка скорости обработки зарегистрированного потока вторичного излучения с поверхности исследуемого образца и выработки команды на исполнительный механизм проводилась путем увеличения скорости вращения барабанного раскладчика и программного увеличения пропускной способности канала обмена данными микроконтроллера SIM1 с компьютером, обеспечивающей рост дискретизации (рис.4). Дискретизация в данном случае определяется количеством зарегистрированных значений в единицу времени.

При повышении напряжения на микроконтроллере SIM3 уменьшается ширина импульса, характеризующего время прохождения ячейки барабанного раскладчика через зону облучения и регистрации (рис.4, а). Установлено, что для используемых микроконтроллеров типа Atmel AVR ATmega328 максимальное значение емкости канала, при котором отсутствуют сбои в работе микроконтроллера, составляет 115200 бит (бит/с).

Определение максимальной скорости вращения барабанного раскладчика, при которой частота дискретизации обеспечивает возможность реализации управляющего воздействия в середине амплитудной части импульса, позволит оценить предельные возможности блока обработки зарегистрированных сигналов и их соответствие предельным возможностям рентгенолюминесцентного метода, обусловленных минералого-технологическими свойствами исследуемого сырья.

Результаты измерений, представленные на рисунке 4, б-д, г, свидетельствуют о возможности обработки информации при максимальной для данного устройства скорости вращения транспортирующего устройства, определяющей величиной поданного на микроконтроллер напряжения. При напряжении в 5V время прохождения ячейки

барабанного раскладчика через зону облучения и регистрации составляет 2 мс.

Эффективность процесса реализации рентгенолюминесцентного метода апатитсодержащих руд Хибинского массива определяются кинетическими характеристиками люминесценции апатита - средним временем жизни возбужденного состояния - τ . В работе [14] показано, что кинетика люминесценции апатита является двухкомпонентной: короткий компонент τ_1 , со значением равным 0,045 мс, определяют ионы редких земель Ce^{3+} , Dy^{3+} , а длительный компонент τ_2 , со значением равным 35 мс, - ионы Mn^{2+} . Причем за время равное τ_1 РЛ апатита разгорается до 90% её максимального значения, что свидетельствует о том, что регистрация интенсивности люминесценции апатита за время равное τ_1 является достаточным условием для его эффективного выделения из минеральной смеси.

Установлено, что возможности рентгенолюминесцентного метода незначительно превышают установленный временной предел, обеспечивающий возможность обработки потока люминесценции с поверхности образца и выработку управляющего решения на исполнительный механизм.

Результаты оценки предельных возможностей блока обработки сигналов с учетом кинетических характеристик рентгенолюминесценции апатита позволяют рассчитать граничную производительность люминесцентного сепаратора.

Производительность сепаратора Q (т/ч) определяется по формуле [15]:

$$Q = 3,6 \cdot n \cdot v \cdot k_3 \cdot \frac{P_{cp}}{L_{cp}},$$

где n - число каналов сепаратора; v - скорость транспортирующего устройства, м/с; $k_3 = L_m/L_\phi$ - коэффициент загрузки сепаратора, равный отношению минимально возможного среднего расстояния между кусками к среднему фактическому; P_{cp} - средняя масса куса обогащаемого класса, кг; L_{cp} - среднее расстояние между кусками, м.

Скорость транспортирующего устройства рассчитывается на основании информации о времени прохождения ячейки барабанного раскладчика в зоне облучения и регистрации по формуле:

$$v = \frac{\pi \cdot D}{N \cdot t} = \frac{3,14 \cdot 1}{40 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 39,25 \text{ м/с},$$

где D - диаметр барабанного раскладчика, м; N - количество ячеек барабанного раскладчика, t - время прохождения ячейки в зоне облучения и регистрации, с.

Среднее расстояние между кусками (L_{cp}) определяется средним размером куса в исследуемом классе крупности, длиной ячейки барабанного раскладчика и толщиной используемого металла

$$L_{cp} = \left(\frac{\pi \cdot D}{N} - l_{cp} \right) + b = \left(\frac{3,14 \cdot 1}{40} - 0,040 \right) + 0,003 = 0,0415 \text{ м},$$

где l_{cp} - средний размер куса; b - толщина металла ячейки барабанного раскладчика, м.

Расчетная производительность одноканального сепаратора для рудной массы крупностью - 50+20мм, средний вес куса которой равен 70 г, составляет

$$Q = 3,6 \cdot 1 \cdot 39,25 \cdot 0,5 \cdot \frac{0,070}{0,0415} = 119,2 \text{ т/ч.}$$

Полученное значение является верхней границей производительности сепарационного оборудования, реализующего процесс разделения в покусковом режиме, определенное без учета условий, накладываемых устройствами транспортирования и разделения. Поскольку рассматриваемая модель радиометрического сепаратора [13] находится в стадии разработки, то оценка частоты срабатывания исполнительного механизма не проводилась. Предлагаемая система отсекающих в данной модели сепаратора существенно отличается от применяемых в существующих радиометрических сепараторах исполнительных механизмов:

- электромагнитные и пневматические шибберные устройства (например, максимальная частота срабатывания быстродействующего электромагнитного шибберного устройства МИ-30 сепаратора СРФ-50 – 20Гц [17]);

- электропневмоклапаны (например, частота срабатывания ЭПК-50, используемого в рентгеноспектральных, рентгенолюминесцентных и фотометрических сепараторах фирмы «ЭГОНТ» достигает 50Гц [16]).

Таким образом, разрабатываемая модель люминесцентного сепаратора, используемая система облучения, регистрации и обработки информации обладает предпосылками для не менее, чем двукратного повышения производительности по отношению к существующим моделям российского сепарационного оборудования [16-17].

Заключение

Проведенные на макетном стенде, моделирующей работу люминесцентного сепаратора, исследования времени обработки регистрируемых сигналов с поверхности исследуемых образцов и выработки управляющих решений позволили оценить предельные возможности блока обработки сигналов. Время прохождения ячейки барабанного раскладчика в зоне облучения и регистрации равно 2мс обеспечивает возможность возбуждения люминесценции апатита – ее разгорания интенсивности до 90% максимального значения, регистрации, обработки сигналов, выработки управляющего решения на исполнительный механизм. Граничное значение производительности люминесцентного сепаратора, основанное на предельных возможностях блока обработки сигналов с учетом кинетических характеристик рентгенолюминесценции апатита, составляет 119,2т/ч. Предлагаемая система отсекающих существенно отличается от применяемых в существующих радиометрических сепараторах исполнительных механизмов обуславливая предпосылки для не менее, чем двукратного повышения производительности по отношению к существующим моделям российского сепарационного оборудования при учете всех определяющих факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ООО «КРАСРАДОС», ООО «РАДОС». Посobie по рентгенорадиометрической сепарации

[Электронный ресурс]. – URL: <http://www.rados.ru/index.php/ru/stati/82-posobie-po-rentgenoradiometricheskoj-separatsii/> (дата обращения: 25.02.2019).

2. Перспективные направления развития технологий обогащения вольфрамсодержащих руд и техногенных образований / Шепета Е.Д., Саматова Л.А., Воронова О.В. // Горный журнал. – 2018. – №10. – С. 67-71.

3. Prospect of preliminary beneficiation use in the poor tungsten ores processing practice / Shepeta E.D., Samatova L.A., Alushkin I.V., Yushina T.I. // Non-Ferrous Metals. – 2016. – №1. – С. 9-15.

4. Tomra's mineral and ore sorting equipment for more profit [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.tomra.com/ru-ru/sorting/mining/> (дата обращения: 15.01.2019).

5. Mineral sorting [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.redwave.com/en/mining/> (Дата обращения: 25.01.2019).

6. Use ore sorting equipment to concentrate ores and cut process costs [Электронный ресурс]. – URL: <https://steinertglobal.com/mining/ore-sorting/> (дата обращения: 25.01.2019).

7. Evaluation of bulk and particle sensor-based sorting systems for the New Afton block caving operation / Nadolski S., Samuels M., Klein B., Hart C. // Minerals Engineering. – 2018. – Vol.121 – P. 169-179.

8. Bridging the gap: Understanding the economic impact of ore sorting on a mineral processing circuit / Lessard J., Sweetser W., Bartram K., Figueroa J., McHugh L. // Minerals Engineering. – 2016. – Vol.91 – P. 92-99.

9. State-of-the-art-technology in ore mining [Электронный ресурс]. – URL: https://www.at-minerals.com/en/artikel/at_State-of-The-Art-Technology_in_Ore_Mining_1852781.html (дата обращения: 20.03.2019).

10. Separating impurities from quartz [Электронный ресурс]. – URL: https://www.at-minerals.com/en/artikel/at_Separating_impurities_from_quartz_1852565.html (дата обращения: 20.03.2019).

11. Способ кусковой сепарации руд. Авторы: Коновалов Г.Н., Наумов М.Е.. Патентообладатель: ОАО «Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии». Патент RU2569528C1. Опубликовано: 27.11.2015, Бюл. №33.

12. Characterising Energy Efficiency of Particle Sorting / Ballantyne G.R., Hilden M., Bartram K., Souto V. // 14th AusIMM Mill Operators' Conference, Brisbane, Australia, 29-31 August 2018.

13. Радиометрический сепаратор. Авторы: Терещенко С.В., Ежов А.А., Власов Б.А., Павлишина Д.Н. Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук. Патент RU2662828C1. Опубликовано: 31.07.2018, Бюл. № 22.

14. Предконцентрация некондиционных руд на основе рентгенолюминесцентных свойств кальцийсодержащих минералов. / Терещенко С.В. // Дисс.

канд. техн. наук (25.00.13). – Владикавказ. – 1991. – 202 с.

15. Радиометрические методы опробования и сепарации минерального сырья / Терещенко С.В., Денисов Г.А., Марчевская В.В. // Санкт-Петербург: Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы (МАНЭД), 2005. – 264 с.

16. Оборудование. Сепараторы. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.egont.ru/> (Дата обращения: 22.01.2019).

17. Услуги. Рентгенорадиометрические сепараторы. [Электронный ресурс]. – URL: <http://technogen-group.ru/> (Дата обращения: 22.02.2019).

Darya N. Shibaeva, C. Sc. in Engineering, Researcher, **Pavel A. Shumilov**, Researcher, **Viktor V. Bulatov**, Engineer, **Sergei V. Tereshchenko**, Dr. Sc. in Engineering, Head of laboratory

Mining Institute Kola Science Centre RAS, Russia, 184209, Apatity, Murmansk region, Fersman st. 24

DETERMINATION OF THE BOUNDARY CAPACITY OF A RADIOMETRIC SEPARATOR USING IMITATION MODELING

Abstract: The article structures the factors influencing the capacity of radiometric separators. The examples of existing Russian and foreign sorting equipment specimens are given. A model stand has been designed which simulates the work of principal units of a radiometric separator. The article describes the major principles to imitate the movement of a transporting device and controlling sensors and to form a signal stream of secondary radiation from the studied sample's surface and its registration with a photodetector. The article also presents the principles of the operation of a device for visualizing the level of a recorded signal and a device for processing and generating a control signal to the actuator.

The assessment was made of the processing velocity of the recorded stream of secondary radiation from the surface of the sample and the generation of a command for the actuator. The result has been analysed of the passage time of an ore piece through the irradiation and registration zone for the Khibiny apatite-containing ores. It was established that the registration of the apatite's luminescence intensity for a 2 ms time is a sufficient condition for its effective separation from the mineral mixture. The calculated boundary value of the luminescent separator capacity is 119.2 t/h.

Keywords: radiometric separator, radiometric separator capacity, modelling, microcontrollers, signal processing velocity, apatite-containing ore, luminescence kinetics.

Article info: received June 01, 2019

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-2-39-45

REFERENCES

1. ООО «KRASRADOS», ООО «RADOS». Posobie po rentgenoradiometricheskoj separacii [Elektronnyj resurs]. – URL: <http://www.rados.ru/index.php/ru/stati/82-posobie-po-rentgenoradiometricheskoj-separatsii/> (data obrashcheniya: 25.02.2019).

2. Perspektivnye napravleniya razvitiya tekhnologij obogashcheniya vol'framsoderzhashchih rud i tekhnogennyh obrazovanij / SHepeta E.D., Samatova L.A., Voronova O.V. // Gornyj zhurnal. – 2018. – №10. – S. 67-71.

3. Prospect of preliminary beneficiation use in the poor tungsten ores processing practice / Shepeta E.D., Samatova L.A., Alushkin I.V., Yushina T.I. // Non-Ferrous Metals. – 2016. – №1. – S. 9-15.

4. Tomra's mineral and ore sorting equipment for more profit [Elektronnyj resurs]. – URL: <https://www.tomra.com/ru-ru/sorting/mining/> (data obrashcheniya: 15.01.2019).

5. Mineral sorting [Elektronnyj resurs]. – URL: <http://www.redwave.com/en/mining/> (Data obrashcheniya: 25.01.2019).

6. Use ore sorting equipment to concentrate ores and cut process costs [Elektronnyj resurs]. – URL:

<https://steinertglobal.com/mining/ore-sorting/> (data obrashcheniya: 25.01.2019).

7. Evaluation of bulk and particle sensor-based sorting systems for the New Afton block caving operation / Nadolski S., Samuels M., Klein B., Hart C. // Minerals Engineering. – 2018. – Vol.121 – P. 169-179.

8. Bridging the gap: Understanding the economic impact of ore sorting on a mineral processing circuit / Lessard J., Sweetser W., Bartram K., Figueroa J., McHugh L. // Minerals Engineering. – 2016. – Vol.91 – P. 92-99.

9. State-of-the-art-technology in ore mining [Elektronnyj resurs]. – URL: https://www.at-minerals.com/en/artikel/at_State-of-The-Art-Technology_in_Ore_Mining_1852781.html (data obrashcheniya: 20.03.2019).

10. Separating impurities from quartz [Elektronnyj resurs]. – URL: https://www.at-minerals.com/en/artikel/at_Separating_impurities_from_quartz_1852565.html (data obrashcheniya: 20.03.2019).

11. Sposob kuskovoj separacii rud. Avtory: Konovalov G.N., Naumov M.E.. Patentobladatel': OAO «Vedushchij nauchno-issledovatel'skij institut

himicheskoy tekhnologii». Patent RU2569528C1. Opublikovano: 27.11.2015, Byul. №33.

12. Characterising Energy Efficiency of Particle Sorting / Ballantyne G.R., Hilden M., Bartram K., Souto V. // 14th AusIMM Mill Operators' Conference, Brisbane, Australia, 29-31 August 2018.

13. Radiometricheskij separator. Avtory: Tereshchenko S.V., Ezhov A.A., Vlasov B.A., Pavlishina D.N. Patentoobladatel': Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie nauki Gornyy institut Kol'skogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk. Patent RU2662828C1. Opublikovano: 31.07.2018, Byul. № 22.

14. Predkoncentraciya nekondicionnyh rud na osnove rentgenoluminescentnyh svoystv

kal'cijsoderzhashchih mineralov. / Tereshchenko S.V. // Diss. kand. tekhn. nauk (25.00.13). – Vladikavkaz. – 1991. – 202 s.

15. Radiometricheskie metody oprobovaniya i separacii mineral'nogo syr'ya / Tereshchenko S.V., Denisov G.A., Marchevskaya V.V. // Sankt-Peterburg: Mezhdunarodnaya akademiya nauk ekologii, bezopasnosti cheloveka i prirody (MANED), 2005. – 264 s.

16. Oborudovanie. Separatory. [Elektronnyj resurs]. – URL: <http://www.egont.ru/> (Data obrashcheniya: 22.01.2019).

17. Uslugi. Rentgenoradiometricheskie separatory. [Elektronnyj resurs]. – URL: <http://technogen-group.ru/> (Data obrashcheniya: 22.02.2019).

Библиографическое описание статьи

Шибяева Д.Н., Шумилов П.А., Булатов В.В., Терещенко С.В. Определение граничной производительности радиометрического сепаратора с использованием имитационного моделирования // Горное оборудование и электромеханика – 2019. – № 2 (142). – С. 39-45.

Reference to article

Shibaeva D.N., Shumilov P.A., Bulatov V.V., Tereshchenko S.V. Determination of the boundary capacity of a radiometric separator using imitation modeling. Mining Equipment and Electromechanics, 2019, no. 2 (142), pp. 39-45.