

На правах рукописи

Новиков Сергей Владленович

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
РЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНОЙ СЕПАРАЦИИ
АВТОМОБИЛЬНОГО ЛОМА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (сфера услуг)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Тисенко Виктор Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Брытов Игорь Александрович

кандидат технических наук,
Шлюфман Евгений Мартынович

Ведущая организация: ЗАО «Механобр инжиниринг»

Защита состоится «__» декабря 2010 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.21 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, главное здание, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «12» ноября 2010 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук

С. Г. Редько

Общая характеристика работы.

Актуальность темы. Процессы производства металлов являются энергоемкими, высоко затратными, расходуют невозполнимые природные ресурсы и наносят экологический ущерб. Например, при выплавке тонны алюминия требуется от 4 до 8 тонн бокситов и расходуется около 15000 кВт-час электроэнергии. Для переплавки тонны вторичного алюминия электроэнергии требуется в 10 раз меньше, исключаются затраты на горные работы и обогащение, существенно снижается экологический вред, связанный с добычей сырья и утилизацией отходов плавления. Металлы используются для производства различных изделий, в том числе легковых автомобилей, которых ежегодно в мире выпускается более 50 млн. штук. Автомобиль на сегодняшний день является наиболее полно перерабатываемым потребительским продуктом в мире. В США 95% вышедших из эксплуатации автомобилей попадают в переработку; и авторециклинг является 16-й крупнейшей отраслью промышленности с оборотом 25 млрд. долларов в год. Эта же отрасль перерабатывает и бытовой лом, в том числе газовые плиты, холодильники и т.п.

При утилизации автомобилей наиболее распространенный вариант промышленной переработки включает их дробление до крупности, при которой происходит механическое разделение узлов и агрегатов, изготовленных из различных материалов, на смешанные между собой кусковые составляющие. Из полученной смеси с использованием воздушной классификации, магнитной и электродинамической сепараций выделяется классифицированный по крупности металлический не магнитный продукт, выход которого составляет 10-15%. Продукт представляет собой многокомпонентную смесь, состоящую на 65÷70% из алюминиевых и магниевых сплавов, а также из немагнитных сортов стали, цинка, меди и сплавов на ее основе. Вторичное использование металлов осуществляется через металлургический передел, для которого требуется, чтобы поступающий на переплавку лом имел заданный состав, т.е. предварительно был рассортирован. Точность разделения смеси определяется требованиями металлургии, приведенными например, в США в ежегодно актуализируемом «Классификаторе отходов». Алюминиево-магниевые сплавы могут быть выделены из смеси кусков немагнитных металлов путем ручной разборки, разделением в тяжелых суспензиях, электродинамической или магнитно-импульсной сепарацией. Каждый из процессов имеет свои преимущества и недостатки. Перечисленные технологии не решают задачу разделения алюминиевых сплавов на группы с различным суммарным содержанием в них примесей (марганец, железо, медь и цинк), выделяемое ими вторсырьё ограничено пригодно в металлургическом переделе без шихтовки.

Задачи выделения алюминиевых сплавов и их разделения могут быть решены рентгеноспектральной сепарацией, основанной на различии металлов по свойствам на атомарном уровне и автоматическом отделении кусков. При рентгеноспектральной сепарации производится регистрация спектров рентгеновского излучения (РИ) кусков

сортируемого материала, возникающих при возбуждении их внешним РИ. Схожую с рентгеноспектральным анализом (РСА) сепарацию отличают случайная форма и различие размеров анализируемых кусков, нестабильность расстояний между источником РИ, куском и детектором, а главное – кратковременность анализа для получения рентабельной производительности. Разница по времени анализа между РСА и сепарацией примерно в 1000 раз. Из-за ограниченного времени при сепарации вместо снятия спектра регистрируемого датчиком излучения производится накопление счета с каждого куска в нескольких областях энергий. При выходе куска из зоны регистрации по накопленным значениям и выбранному алгоритму производится вычисление аналитического параметра, характеризующего состав куска. Вычисленное значение сравнивается с пороговым, по результату сравнения производится отделение кусков. Задачей при проектировании сепаратора является создание условий облучения и регистрации, выбор алгоритма, количества и границ энергетических областей такими, чтобы куски с одинаковым содержанием отбирались независимо от размеров, изменений расстояний и нестабильностей аппаратуры в промышленных условиях.

Технология рентгеноспектральной сепарации в разделении лома была апробирована в России в конце 80-х годов. Экспериментальный рентгеноспектральный сепаратор позволял обрабатывать лом крупности от 80 до 20 мм. Испытания выявили принципиальные преимущества этой технологии перед альтернативными – обеспечивалось автоматизированное разделение кусков лома; была показана возможность разделения алюминиевых сплавов между собой; процесс сепарации экологически чистый. Но промышленным потребителям был необходим автоматический контроль, снижение границы крупности обрабатываемого материала до 12 мм и повышение производительности. Требования промышленности определили **цель работы** - создание инновационной технологии на основе промышленного автоматизированного рентгеноспектрального сепаратора для оказания услуг по разделению лома цветных металлов с расширенными технологическими возможностями.

Создатели экспериментального сепаратора опубликовали физико-математические основы рентгеноспектральной сепарации алюминиевого вторичного сырья и алгоритм обработки сигналов – разделение спектра на 2 области, выбор границ областей разделения, вычисление аналитического параметра по методу спектральных отношений. Но модели для расчета измерительного канала не приводилось, т.е. сепаратор проектировался эмпирическим путем.

Для достижения цели решены следующие задачи:

- разработана физически обоснованная математическая модель измерительного канала рентгеноспектрального сепаратора, составлена вычислительная программа для ее расчета, экспериментально проверена правильность расчетов;

- теоретически исследовано влияние нестабильностей детектора и источника рентгеновского излучения, а также траектории движения кусков и их размеров на значения аналитического параметра сепарируемых кусков лома;
- для повышения точности сепарации лома при изменениях чувствительности детектора и нестабильности рентгеновской трубки предложены новый метод вычисления аналитического параметра, способ подстройки чувствительности детекторов и основанный на их использовании автоматический контроль работоспособности сепаратора;
- для сокращения разброса траектории реализовано управление работой вибропитателя с электромагнитным приводом на частоте собственных механических колебаний.

При выполнении работы были получены теоретические и экспериментальные результаты, определяющие **научную новизну исследований**:

1. предложена физически обоснованная математическая модель измерительного канала рентгеноспектрального сепаратора;
2. предложена методика применения модели для оценки влияния на аналитический параметр нестабильностей детектора, источника излучения и траектории движения кусков через зону контроля;
3. предложен и исследован метод вычисления аналитического параметра, позволяющий обеспечить заданную точность автоматизированного технологического процесса сепарации лома цветных металлов при изменениях чувствительности детектора и нестабильности рентгеновской трубки.

Практическая значимость:

1. Разработаны вычислительная программа расчета модели измерительного канала рентгеноспектрального сепаратора, применимая для сепарации лома, руд и шлаков, и методика ее применения для оценки влияния на аналитический параметр нестабильностей детектора, источника излучения и траектории движения кусков через зону контроля.
2. Предложен алгоритм автоматической обработки получаемого от кусков лома вторичного рентгеновского излучения (РИ) и способ автоматической подстройки чувствительности детекторов.
3. Разработаны рекомендации для выбора режима работы источника РИ; найдены условия, при которых обеспечивалась достоверность аналитического параметра при значительно сниженной мощности источника излучения.
4. Разработаны рекомендации для управления работой вибропитателей с электромагнитным приводом, используемых для подачи кусков лома, на частоте собственных механических колебаний.
5. Рекомендовано использовать для контроля измерительного канала рентгеноспектрального сепаратора спектр РИ, рассеянного камерой при

отсутствии кусков. Спроектированная на основе рекомендации система контроля позволяет автоматизировать работу сепаратора.

6. На основе комплекса рекомендаций в ООО «ЭГОНТ» произведена разработка, изготовление и испытания промышленного рентгеноспектрального сепаратора для выделения кусков алюминиевых и магниевых сплавов из смеси немагнитных металлов.

Положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель измерительного канала рентгеноспектрального сепаратора.
2. Метод вычисления аналитического параметра, характеризующего содержание суммы элементов примесей в сепарируемых сплавах.
3. Способ автоматической подстройки чувствительности детекторов, позволяющий упростить систему регистрации, повысить точность и быстродействие подстройки.
4. Методика оценки влияния на аналитический параметр нестабильностей детектора, источника излучения и траектории движения кусков через зону контроля.

Апробация работы. Разработанный по результатам проведенных исследований сепаратор РСЭ-50 был испытан и использован в промышленной технологической линии по сортировке металлического лома фирмы Camden Iron & Metal, Inc. (США, Нью-Джерси). Рекомендации использовались при модернизации сепараторов для обогащения хромовых и железных руд, а также медно-никелевых шлаков.

Основные результаты работы докладывались на IV Конгрессе обогатителей стран СНГ (Москва, 2003г.), круглом столе ЗАО «Полюс» по теме «Предварительное обогащение золотосодержащих руд с применением радиометрических методов обогащения» (Москва, 2006г.), V Международном конгрессе по управлению отходами и природоохранными технологиями ВейстТэк (Москва, 2007г.), Уральском горнопромышленном форуме «Горное дело, оборудование, технологии» (Екатеринбург, 2007г.), на 21 Мировом Горном Конгрессе (Краков, Польша, 2008г.), научно-практической конференции "Рентгенорадиометрическая сепарация минерального сырья и техногенных отходов" (Екатеринбург, 2008г.), научно-практической конференции РИВС-2008 (Санкт-Петербург, 2008г.), Уральском горнопромышленном форуме «Горное дело, оборудование, технологии» (Екатеринбург, 2009г.), на научных семинарах факультета Инноватики СПбГПУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 статей (6 статей опубликованы в научных изданиях, определенных ВАК), 1 патент РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Общий объем диссертации составляет 133 страницы машинописного текста, иллюстрированного 35 рисунками и 16 таблицами, включает 75 наименований литературы

Основное содержание работы

Во введении рассматривается актуальность исследований в области развития рентгеноспектральной сепарации лома, содержащего цветные металлы, формулируются цели и задачи исследований, показана научная новизна и практическая значимость.

В первой главе приведен обзор технологий переработки автомобильного лома и сравнение технологий выделения алюминиевых сплавов из смеси кусков немагнитных металлов, получаемых в современном промышленном технологическом процессе утилизации легкого бытового лома. Сравняются технологии ручной сортировки, обогащения в тяжёлых суспензиях, электродинамической и магнитно-импульсная сепараций. Приведен анализ опыта работы экспериментального рентгеноспектрального сепаратора. Поставлены задачи исследования.

В главе 2 приведена разработанная математическая модель измерительного канала рентгеноспектрального сепаратора, позволяющая рассчитать зарегистрированный вторичный (флуоресцентный и рассеянный) спектр образца. Необходимость создания модели определена тем, что публикации о современных программах расчета спектра флуоресценции редки, так как чаще в рентгеноспектральном анализе решается обратная задача – расчет содержаний элементов в образце по вторичному спектру. Модель создана на основе известных математических выражений, описывающих физические процессы рентгеновского флуоресцентного анализа. В рассмотрение включены процессы генерации первичного излучения, его фильтрации, поглощение и рассеяние в воздухе, флуоресценция образца, когерентное и не когерентное рассеяние на образце, процесс детектирования, система обработки и представления информации. Рентгенооптическая схема измерительного канала приведена на рис 1.

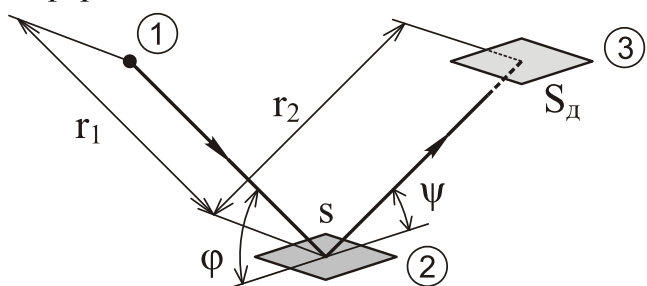


Рис. 1. Рентгенооптическая схема измерительного канала

1 – источник РИ

2 – образец

3 – детектор

Факторы, влияющие на регистрируемый спектр РИ, могут быть разделены на:

(1) связанные с источником РИ, (2) с образцом, (3) с детектором:

- 1.1. атомный номер материала анода рентгеновской трубки (Z);
- 1.2. анодное напряжение (E_0) и ток (i_a) рентгеновской трубки;
- 1.3. материал и толщина выходного окна рентгеновской трубки (μ_{Be} ; ρ_{Be} ; d_{Be});
- 1.4. материал и толщина фильтра первичного РИ (μ_{Al} ; ρ_{Al} ; d_{Al}).
- 2.1. содержания элементов в образце (C_i);
- 2.2. площадь образца, облучаемая первичным излучением (s);
- 2.3. расстояние между источником РИ и поверхностью образца (r_1);
- 2.4. расстояние между поверхностью образца и входным окном детектора (r_2);

- 2.5. угол между потоком первичного излучения и плоскостью образца (φ);
- 2.6. угол отбора излучений образца (ψ).
- 3.1. площадь входного окна детектора (S_d);
- 3.2. зависимость эффективности регистрации излучения от его энергии (μ_d ; ρ_d ; d_d ; $d_{ок}$);
- 3.3. энергетическое разрешение детектора (R_d , E_d).

Для определения граничных условий модели по рентгенофизическим свойствам элементов проведен анализ состава алюминиевых сплавов и элементного состава лома. Данные по составу алюминиевых сплавов использовались для определения возможности решения технологической задачи разделения алюминиевых сплавов. Анализ показал, что в основной набор элементов-примесей алюминиевых сплавов и лома входит ограниченное количество элементов – это Mg, Al, Si, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb. Содержание этих металлов (кроме Mg, Al и Si), в алюминиевых сплавах колеблется в пределах от 0 до 12%. Линии характеристических излучений K-серий перечисленных элементов (кроме Mg, Al и Si) и L-серии свинца лежат в энергетическом интервале от 4 до 15 кэВ. Спектры вторичного излучения кусков лома цветных металлов приведены на рис.2. Анализ элементного состава лома и алюминиевых сплавов показал, что для решения задач их разделения целесообразно вычислять аналитический параметр как функцию суммарного содержания элементов-примесей (от Cr до Zn плюс Pb). Для эффективного возбуждения характеристического излучения этих элементов энергия источника первичного излучения должна быть в диапазоне 20 - 30 кэВ.

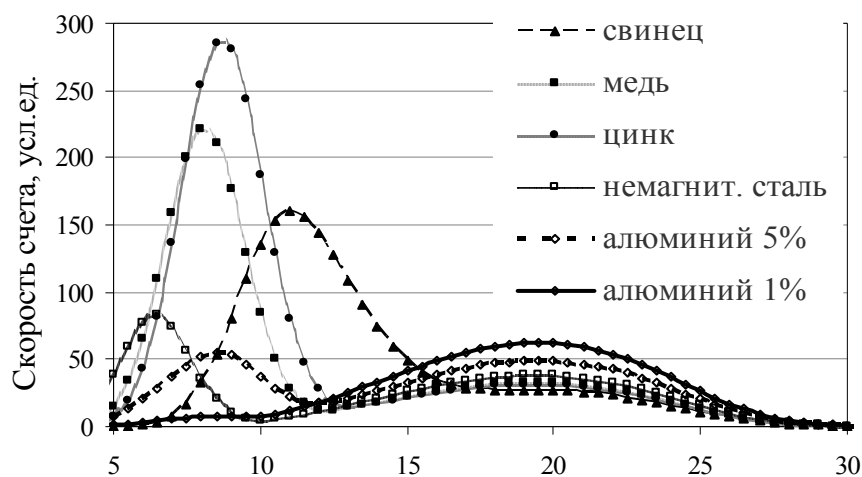


Рис. 2. Спектры вторичного излучения кусков лома немагнитных металлов

Проведена разработка математической модели измерительного канала рентгеноспектрального сепаратора. Структурная схема измерительного канала рентгеноспектрального сепаратора, может быть представлена в виде четырех объектов: источника излучения (1), образца (2), детектора (3) и устройства обработки получаемой от детектора информации (4) (рис.3).

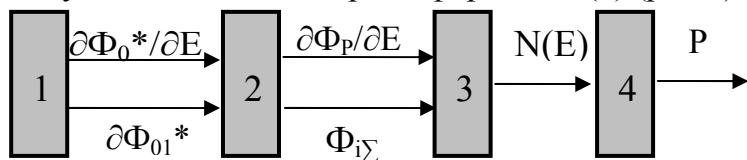


Рис. 3. Структурная схема измерительного канала рентгеноспектрального сепаратора

Источник РИ, состоящий из рентгеновской трубки с дополнительным фильтром первичного излучения, создает потоки тормозного ($\partial\Phi_0^*/\partial E$) и характеристического (Φ_{01}^*) излучений на поверхности образца. Облученный образец создает на поверхности входного окна детектора потоки флуоресцентных $\Phi_{i\Sigma}$ и рассеянного ($\partial\Phi_r/\partial E$) излучений. Детектор преобразует полученные потоки РИ в электрические импульсы, пропорциональные энергии поглощенных фотонов, и передает их на устройство обработки. При этом совокупность электрических импульсов соответствует зарегистрированному вторичному спектру $N(E)$. Устройство обработки информации по заданному алгоритму вычисляет значение аналитического параметра P , характеризующее содержания элементов в образце. Алгоритм определяет количество выделяемых из вторичного спектра энергетических областей, их границы и метод вычисления аналитического параметра. Вычисленное значение P сравнивается с заданным в соответствии с технологическими требованиями, предъявляемыми к продуктам сепарации. По результату сравнения принимается решение об отделении образца.

При сепарации анализируемые куски имеют различные размеры, различную поверхность, существенно изменяются расстояния от куска до источника РИ и детектора из-за разброса траекторий подачи. При проектировании измерительного канала рентгеноспектрального сепаратора для решения конкретного технологического задания основным требованием к каналу является получение стабильного значения аналитического параметра для одинаковых по содержаниям образцов независимо от влияющих факторов. Для оценки влияния фактора на аналитический параметр значения последнего вычисляются по выбранному алгоритму из расчетного вторичного спектра $N(E)$ при изменении фактора.

Для расчета зарегистрированного вторичного спектра предложена модель, в которой рассчитываемый диапазон энергий E разбивается на n диапазонов шириной ΔE , в пределах каждого диапазона энергий $\Delta E_n = [E_n; E_n + \Delta E[$ излучение рассматривается как монохроматическое. Раздельно рассчитываются потоки тормозного (1,2) и характеристического (3,4) излучений поступившие на образец: Рассчитываются созданные образцом потоки рассеянного (5) и характеристического излучения (6, 8÷10), вызванные тормозным и характеристическим первичным РИ (7). Определяются спектральные плотности потока, поступившего на окно детектора (11), и зарегистрированных детектором с энергией ΔE_n импульсов (12). По совокупности зарегистрированных импульсов (13) с учетом конечного разрешения детектора (14) рассчитывается зарегистрированный спектр (15).

$$(\partial\Phi_0^*/\partial E)_n = 8,8 \cdot 10^8 \frac{\Delta E}{E} \cdot Z_a \cdot i_a \cdot \left(\frac{E_0}{E_n} - 1 \right) \cdot \frac{s}{4\pi \cdot r_1^2} \cdot K_{\Phi n} \quad (1)$$

$$K_{\Phi n} = \exp(-\mu_{Be_n} \rho_{Be} d_{Be}) \cdot \exp(-\mu_{B_n} \rho_B r_1) \cdot \exp(-\mu_{Al_n} \rho_{Al} d_{Al}) \quad (2)$$

$$\Phi_{01n}^* = (\Phi_{01n}^{K\alpha} + \Phi_{01n}^{K\beta} + \Phi_{01n}^{L\alpha 1} + \Phi_{01n}^{L\alpha 2} + \Phi_{01n}^{L\beta 1} + \Phi_{01n}^{L\beta 2} + \Phi_{01n}^{L\gamma 1}) \cdot K_{\Phi n} \cdot s / (4\pi \cdot r_1^2) \quad (3)$$

$$\Phi_{0ln}^{K\alpha} = 5 \cdot 10^{14} \frac{i_a \gamma_K \omega_K p_{K\alpha}}{Z_a} \cdot \left(1 - \frac{7Z_a - 80}{14Z_a - 80}\right) \cdot \left(\frac{E_0}{E_K} - 1\right)^{1.67}, E_0 > E_K \text{ и } E_{K\alpha} \in [E_n; E_n + \Delta E] \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial \Phi_p}{\partial E}\right)_n = \left(\left(\frac{\partial \Phi_0^*}{\partial E}\right)_n + \Phi_{0ln}^*\right) \cdot \frac{\sum_i C_i (\sigma_{in}^{kor} + \sigma_{in}^{некор})}{\left(\sin^{-1} \varphi + \sin^{-1} \psi\right) \cdot \sum_i C_i \mu_{in}} \quad (5)$$

$$\Phi_{i\Sigma n} = \sum_i (\Phi_{in}^{K\alpha} + \Phi_{in}^{K\beta} + \Phi_{in}^{L\alpha 1} + \Phi_{in}^{L\alpha 2} + \Phi_{in}^{L\beta 1} + \Phi_{in}^{L\beta 2} + \Phi_{in}^{L\gamma}) \quad (6)$$

$$\Phi_{in}^{K\alpha} = \sum_n \Phi_{i\Delta n}^{K\alpha} + \sum_n \Phi_{i0n}^{K\alpha} \quad (7)$$

$$\Phi_{i0n}^{K\alpha} = \Phi_{0ln}^* \cdot K_i^K \cdot p_{K\alpha} \cdot \tau_n^i / \left(\left(\mu_{ln} / \sin \varphi\right) + \left(\mu_i^{K\alpha} / \sin \psi\right)\right) \text{ при } E_n > E_{Ki} \quad (8)$$

$$\text{где } \mu_{ln} = \sum_i \mu_{in} C_i \quad (9), \quad K_i^K = (1 - 1/S_K) \cdot \omega_K \cdot C_i \quad (10)$$

$$\left(\frac{\partial \Phi_{ок}}{\partial E}\right)_n = \left(\left(\frac{\partial \Phi_p}{\partial E}\right)_n + \Phi_{i\Sigma n}\right) \cdot (S_d / 4\pi \cdot r_2^2) \cdot \exp(-\mu_{B_n} \cdot \rho_B \cdot r_2) \quad (11)$$

$$\left(\frac{\partial N_{ID}}{\partial E}\right)_n = \left(\frac{\partial \Phi_{ок}}{\partial E}\right)_n \cdot (1 - \exp(\mu_{д_n} \cdot \rho_d \cdot d_d)) \cdot \exp(-\mu_{Be_n} \cdot \rho_{Be} \cdot d_{ок}) \quad (12)$$

$$N_{n_m} = \frac{\Delta E}{E} \cdot \frac{\left(\frac{\partial N_{ID}}{\partial E}\right)_n}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(E_n - E_m)^2}{2\sigma_n^2}\right) \text{ при } E_n - 3\sigma_n \leq \Delta E_m \leq E_n + 3\sigma_n \quad (13)$$

$$\sigma_n = (R_d \cdot \sqrt{E_d / E_n}) / 236 \quad (14) \quad N_n = \sum_m N_{n_m} \quad (15)$$

Модель позволяет независимо изменять параметры источника РИ, параметры рентгенооптической схемы (расстояния и углы), параметры детектора (площадь, эффективность регистрации и энергетическое разрешение) и параметры образца (размер и состав). Сравнивая влияние факторов на аналитический параметр, вычисленный по различным алгоритмам, можно выбрать наиболее эффективный из алгоритмов, в том числе оптимизировать энергетические границы энергетических областей и метод вычисления.

Модель позволяет рассчитывать спектры образцов с произвольным набором и содержаниями элементов, но построенная на основании модели вычислительная программа должна включать в свой состав справочные данные по каждому из элементов, что увеличивает ее объем. Точность расчета спектра по модели и объем вычислительной программы зависят от ширины диапазона энергий, выбираемых в качестве шага расчета. При шаге $\Delta E = 0,1$ кэВ расчет производится с разрешением, существенно превосходящим энергетические разрешения сцинтилляционных и пропорциональных детекторов РИ, а также сравнимым с разрешениями полупроводниковых детекторов.

Вычислительная программа расчета по модели использует данные о рентгенофизических свойствах элементов, приводимые в справочниках. Таблицы массовых коэффициентов ослабления от энергии и массовых коэффициентов рассеяния в справочниках содержат данные только для части энергий; значения с

требуемым шагом 0,1 кэВ были рассчитаны методом кусочной аппроксимации. При выборе границ расчета было учтено, что верхняя граница энергий зарегистрированных импульсов оказывается выше анодного напряжения рентгеновской трубки из-за конечного разрешения детектора. Ограничение нижней границы программы расчета на уровне 3 кэВ позволило упростить программу за счет исключения из расчета характеристических излучений L-серий элементов с атомными номерами ниже 47 (до серебра). Основанием ограничения является существенное ослабление излучений с энергиями ниже 3 кэВ слоем воздуха между образцом и детектором. Набор элементов, включаемых в программу расчета, определяется технологической задачей. Программа расчета по 25 элементам с диапазоном энергий от 3 до 100 кэВ, включающая рентгенофизические данные с шагом 0,1 кэВ, имеет объем около 35 мегабайт.

Для оценки достоверности расчётов была собрана экспериментальная установка. Фон от камеры измерений, расчёт которого затруднителен, определялся экспериментально. Источник излучения – рентгеновская трубка, анод – вольфрам, 27 кВ, 2 мА, фильтр – алюминий 1 мм. Детектор – пропорциональный счетчик, заполнение Хе, разрешение 18% на линии Mn K α . Образец – медь 0,4 см². Сравнение расчёта по модели и экспериментальных спектров приведено на рис.4. Сопоставление экспериментального спектра при учете камеры с расчётным спектром продемонстрировало достаточную точность модели.

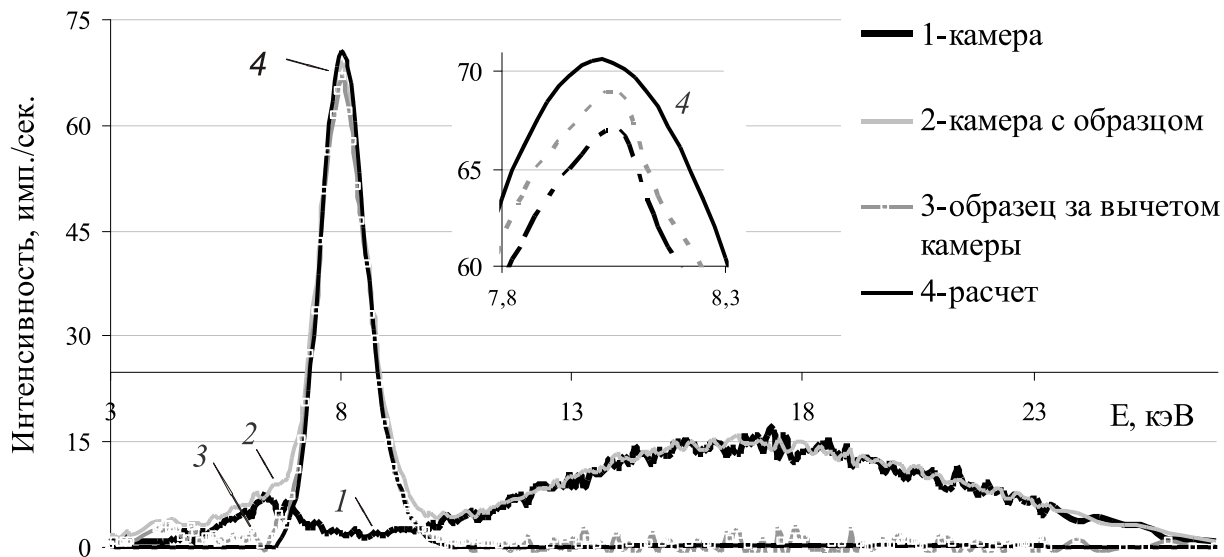


Рис.4. Сравнение расчёта по модели и экспериментальных спектров

Разработанная модель применима для анализа измерительного канала как сепаратора лома цветных металлов, так и для сепараторов руд металлов и их шлаков. При использовании модели для руд и шлаков достаточно внести в вычислительную программу физические величины и рентгеноспектральные энергетические зависимости элементов, входящих в состав руд.

В главе 3 приведены результаты использования модели для оценки влияния узлов сепаратора на точность определения аналитического параметра, определяющего точность разделения многокомпонентной смеси лома.

Представлен анализ современных детектирующих устройств и обоснована целесообразность применения сцинтилляционного детектора в качестве устройства регистрации спектров вторичного РИ кусков при выделении алюминиевых сплавов из смеси немагнитных цветных металлов. Проанализирован один из наиболее универсальных и применимых в условиях покусковой сепарации методов спектрального анализа - метод спектральных отношений в условиях временной и температурной нестабильности преобразования детекторами энергии фотонов РИ в амплитуду импульсов выходного напряжения, т.е. при изменении чувствительности. Анализ выявил зависимости аналитических параметров образцов лома от изменения чувствительности детектора, вызывающей смещение границ энергетических интервалов выбранных на вторичном спектре.

Предложен новый метод вычисления аналитического параметра, позволяющий стабилизировать точность сепарации, менее зависимый от изменения чувствительности тракта регистрации. Во время работы сепаратора только часть времени зона облучения и контроля занята кусками. Время, когда кусков в области облучения нет, может использоваться для получения информации об излучении, рассеиваемом камерой. Определение наличия куска в зоне контроля (по параметрам регистрируемых сигналов или по сигналу дополнительного датчика) используется во всех сепараторах кусковых материалов. Границы энергетических интервалов сохраняются неизменными и при накоплении счета от куска, и при накоплении счета излучения, рассеиваемого камерой. Автор предлагает вычислять аналитический параметр P по следующей формуле:

$$P = \frac{N_1}{N_2 - N_1} \cdot \frac{N_{2K} - N_{1K}}{N_{1K}}, \quad (16)$$

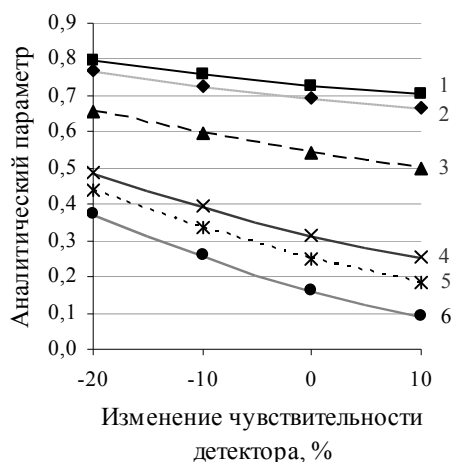
где N_1 - скорость счета при наличии куска в энергетическом интервале 4-15 кэВ;
 N_2 - интегральная скорость счета при наличии куска в энергетическом интервале более 4 кэВ; N_{1K} и N_{2K} - скорости счета в тех же интервалах при отсутствии куска в зоне облучения.

Погрешность измерения аналитического параметра определяется в основном ограниченным количеством импульсов, получаемых от кусков, каждый из которых в процессе сепарации находится в зоне облучения и контроля единицы или первые десятки миллисекунд. Например, для класса крупности -50+25 мм кусок со средним размером 35 мм при скорости 2 м/с проходит зону регистрации за 18 мс. При интегральной скорости счета $N_2=50.000$ и равенстве скоростей счета в энергетических интервалах от 4 до 15 кэВ и более 15 кэВ СКО =9,6%. Накопление счета за время ряда промежутков между кусками для вычисления параметра камеры позволяет практически сохранить точность измерения аналитического параметра. Накопление

счета за секунды или десятки секунд допустимо, так как изменение чувствительности ФЭУ при включении или от изменения температуры имеет большие постоянные времени. Соотношение долей спектра рассеянного камерой при отсутствии кусков может использоваться для автоматизированного контроля состояния измерительного канала.

Зависимости аналитического параметра образцов цинка, меди, железа и алюминиевых сплавов с 10, 5,4 и 0,3% примесей от чувствительности детектора по методу спектральных отношений и предложенному методу приведены на рис.5.

Метод спектральных отношений



Предложенный метод

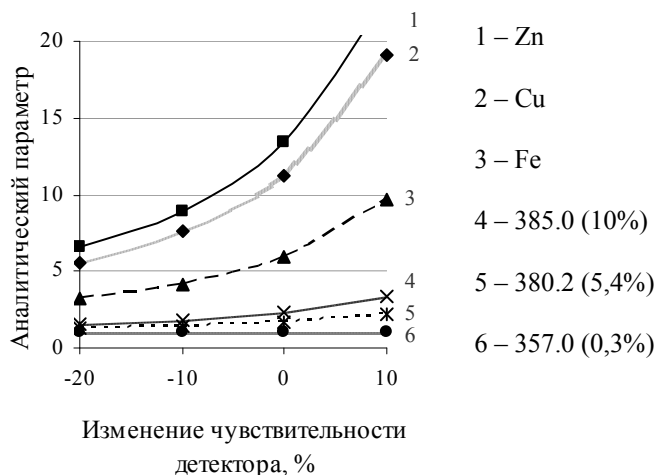


Рис.5. Зависимости аналитических параметров образцов от чувствительности детектора

Лучшую компенсацию создает использование систем подстройки чувствительности детекторов и тракта регистрации в целом. Предложен новый способ автоматической подстройки чувствительности трактов регистрации сепараторов кусковых материалов, основанный на стабильности спектра рентгеновского излучения, рассеянного камерой при отсутствии кусков. Способ позволяет повысить точность и быстродействие подстройки за счет использования большей части спектра, чем при подстройке по спектральной линии. На рис.6 приведены расположение на спектре каналов при изменении чувствительности тракта регистрации (а) и структурная схема реализации предложенного способа (б).

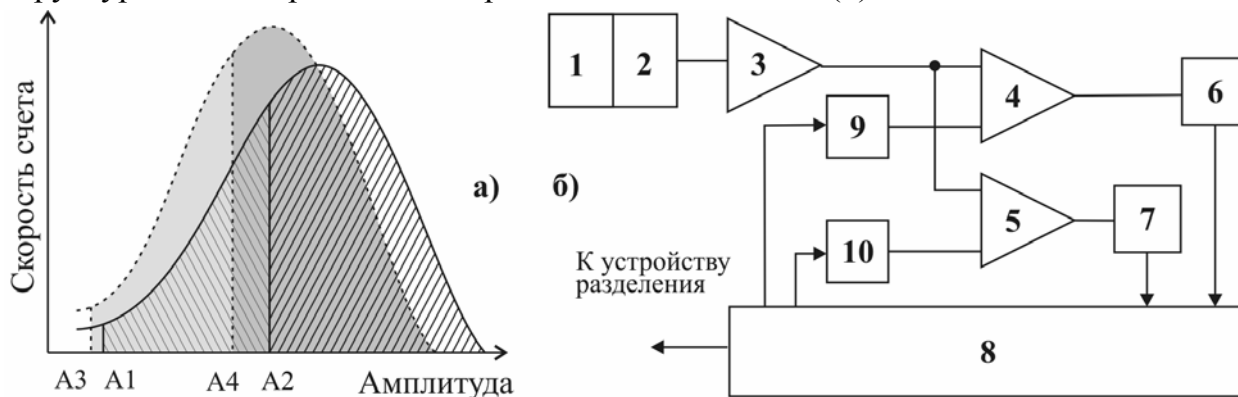


Рис. 6. Стабилизация чувствительности тракта регистрации с автоподстройкой

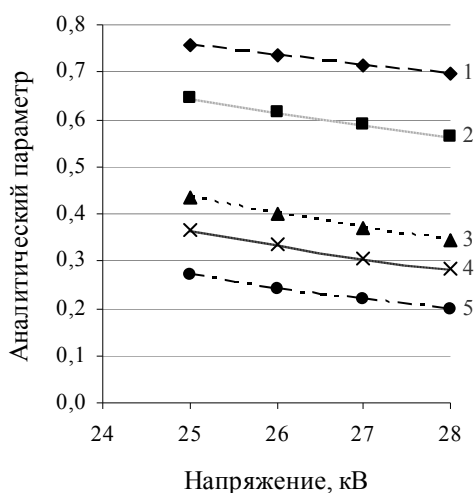
Вызванные РИ в сцинтиляторе 1 фотоны регистрируются фотоэлектронным умножителем 2, подключенным к усилительному тракту 3. Импульсы с выхода

усилительного тракта поступают на два компаратора 4 и 5. Один из них срабатывает от импульсов с амплитудами более A_1 , а второй - от импульсов с амплитудами более A_2 . Выходы компараторов соединены со входами счетчиков 6 и 7 соответственно. Контроллер 8 производит периодический опрос счетчиков и определяет периоды отсутствия кусков в зоне регистрации. Накопив значения счетчиков за несколько периодов опроса, в которые не попадали анализируемые куски, контроллер производит вычисление отношения накопленных значений. Сравнив его с заданным значением отношения, контроллер корректирует значения порогов компараторов путем изменения кодов на входах цифро-аналоговых преобразователей 9 и 10. При снижении чувствительности тракта регистрации пороги компараторов будут снижаться от A_1 к A_3 и от A_2 к A_4 соответственно. Использование для подстройки большей части спектра повышает точность и быстродействие. Использование одних и тех же узлов в режиме разделения времени для подстройки и для анализа позволяет аппаратно упростить тракт регистрации и повысить его надежность.

Экспериментально проведено сравнение РТ с различными материалами анода (молибден, серебро, вольфрам) и обосновано применение для сепарации лома цветных металлов РТ с вольфрамовым анодом и дополнительным алюминиевым фильтром. На основании расчета и анализа влияния на спектры регистрируемого излучения дополнительного фильтра первичного излучения, рекомендовано использование алюминиевых фильтров с толщиной 0,4-0,5 мм.

Сравнение нестабильностей определения аналитических параметров при длительном изменении анодного напряжения РТ при расчетах по методу спектральных отношений и методу, предложенному автором, приведенное на рис. 7, показало большую устойчивость предложенного метода.

Метод спектральных отношений



Предложенный метод

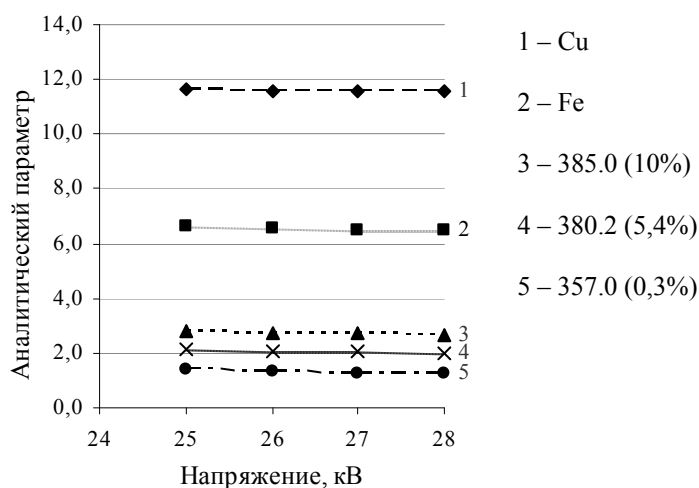


Рис.7. Зависимости аналитического параметра образцов при длительном изменении анодного напряжения

На основании расчета времени пролета со скоростью 3 м/с куска класса – 25+12 мм через рентгеновскую зону, ограниченную коллиматором до высоты не минимального размера куска, а также на основании анализа влияния пульсаций

анодного напряжения с частотой 100 Гц на точность определения аналитического параметра, рекомендовано использование источников анодного напряжения РТ, работающих с повышенной частотой.

Исследовано влияние траектории движения кусков и их размера на точность сепарации. Для оценки влияния рассчитаны аналитические параметры образцов средних и предельных размеров в классах крупности $-50+25$ мм и $-25+12$ мм при ряде расстояний от образца до окна детектора РИ. В качестве образцов были проанализированы цинк, железо и алюминиевые сплавы, содержащие соответственно 0,3, 4,9 и 10% примесей. Рассчитанные зависимости приведены на рис.8. Из зависимостей следует, что для решения задачи выделения алюминиевых сплавов из смеси лома необходимо применение устройств подачи, обеспечивающих относительное изменение траектории в пределах $\pm 15\%$ – $\pm 20\%$ (для классов $-25+12$ мм и $-50+25$ мм соответственно). При использовании указанных устройств подачи сепарация классов $-50+25$ мм и $-25+12$ мм возможна на одном оборудовании с одинаковыми режимами работы РТ и детектора. При изменении класса крупности достаточно изменить траекторию подачи материала. Для обоих классов переход от технологической задачи выделения алюминиевых сплавов к задаче их разделения не требует изменения траектории подачи материала, режимов работы РТ и детектора, и может быть произведен изменением порогового значения аналитического параметра. При использовании устройств подачи материала, создающих разброс траектории большой $\pm 15\%$ – $\pm 20\%$, траекторию падения материала необходимо удалять от детектора и источника РИ. Сохранение загрузок детектора, необходимых для сохранения точности определения аналитического параметра, потребует увеличения анодного тока РТ (изменение анодного напряжения вызовет не только изменение плотности потока, но и изменение спектра РИ). При увеличении мощности РТ также возрастет уровень РИ, рассеянного камерой сепаратора, что увеличит его вклад в погрешность определения аналитического параметра.

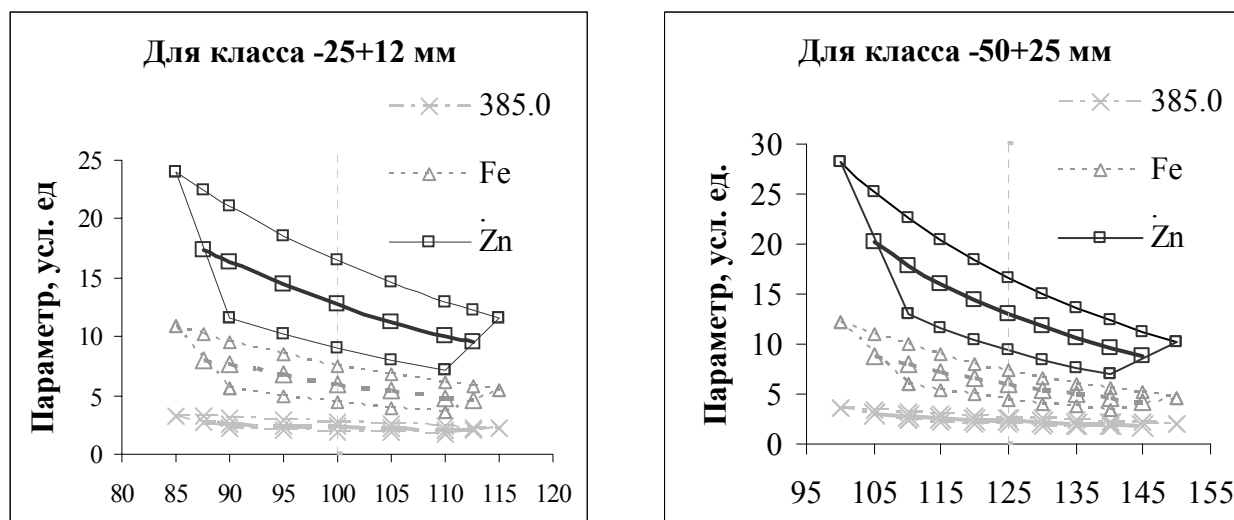


Рис.8. Зависимости аналитич. параметров образцов от расстояния образец-детектор, мм

Необходимую величину разброса имеют острорезонансные ВП, разработанные для подачи рудных продуктов в ООО «ЭГОНТ». Для управления работой ВП на его резонансной частоте независимо от массы материала, находящегося на лотке в процессе работы, потребовалась разработка, изготовление и испытания специального блока управления. Блок управления ВП, предназначен для питания острорезонансных ВП, снабженных датчиками обратной связи, синусоидальными импульсами тока с резонансной частотой ВП. Блок определяет фазу подачи электрического импульса и количество энергии, необходимой для компенсации потерь, происходящих при колебаниях ВП. Принцип действия управления ВП заключается в следующем: при колебательных движениях механических частей ВП происходит изменение зазора электромагнита. Во время уменьшения зазора обмотка электромагнита подключается на короткое время к заряженному конденсатору. Ток разряда конденсатора через обмотку создает электромагнитное усилие, которое компенсирует все потери энергии в колебательной системе ВП, расходуемые на транспортировку продуктов и другое. Дозаряд конденсатора производится при увеличении зазора в электромагните.

В главе 4 описывается внедрение выработанных рекомендаций на промышленном образце рентгеноспектрального сепаратора для сортировки автомобильного лома немагнитных металлов. Сепаратор был разработан при личном участии автора. Рентгеноспектральный сепаратор РСЭ-50 предназначен для сортировки лома цветных металлов с размерами кусков от 50 до 12 мм (от 2" до 0,5"). Сепаратор позволяет выделять из лома немагнитных металлов алюминий и его сплавы. Кроме того, из алюминиевого продукта могут быть выделены группы алюминиевых сплавов по суммарному содержанию в составе примесей марганца, меди, железа и цинка. Технические данные сепаратора РСЭ-50 приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технические данные сепаратора РСЭ-50

№	Наименование	Единицы измерения	Показатели при крупности, мм	
			-50 + 25	- 25 + 12
1	Производительность	т / час	до 10	до 3
2	Количество сортируемых кусков, не менее	1 / час	400.000	1.000.000
		1 / сек	110	280
3	Количество каналов сортировки	ед.	8	8
4	Обнаруживаемые содержания, не менее при разделении алюминиевых сплавов сумма железа, меди, цинка при сепарации руд хрома, марганца	%	2	3
		%	5	6
5	Контроль показателей		автоматический	
6	Время непрерывной работы	час	до 22	до 22
7	Потребление, не более - электроэнергии 220 В - сжатого воздуха (P = 0,6 МПа) - сжатого воздуха на 1 т. концентрата	кВт / час	1,2	1,2
		м ³ / мин	3	5
		м ³	25	25
8	Габариты сепаратора	мм	1970 x 1220 x 1850	

Сортировка осуществляется путем равномерной подачи кусков из загрузочного бункера в зону контроля сепаратора, где поток кусков подвергается рентгеновскому

облучению. Регистрация вторичного излучения сортируемых кусков осуществляется сцинтилляционными детекторами. По результату анализа вторичного РИ куски, соответствующие требованиям технологического задания сепарации, автоматически отделяются из потока сепарируемого материала электропневмоклапанами. Электронные блоки, управляющие работой сепаратора, размещены в стойке, связанной с сепаратором комплектом кабелей. Конструкция сепаратора имеет 2 секции по 4 канала в каждой. Секции выполнены независимо по электрическим цепям, подводу кусков лома и выводу продуктов сепарации. Каждая секция может обрабатывать куски лома крупностью $-50 + 25$ мм или $-25 + 12$ мм. Конструкция сепаратора обеспечивает защиту обслуживающего персонала от шума и рентгеновского излучения.

После заводских испытаний сепаратор был установлен на площадку Camden Iron & Metal, Inc. (Camden, NJ, США) и включен в технологическую линию для циклической сепарации материала, предварительно классифицированного по крупности на классы $-50+25$ и $-25+12$ мм. В исходном питании, кроме автомобильного лома, присутствовал дробленый лом бытовых и производственных отходов. Содержание алюминиевой фракции в исходном материале составляло $70\div 75\%$. Технологической задачей РСЭ-50 являлось выделение продукта с содержанием алюминиевых сплавов не менее 90%. Работа сепаратора обеспечивала выполнение поставленной задачи. Например, в опыте по сепарации класса $-25+12$ мм при производительности около 3 т/ч на сепаратор были получены результаты, представленные в таблице 2.

Таблица 2. Содержания металлов в продуктах сепарации лома класса $-25+12$ мм

Продукты	Выход, %	Содержание, %				Извлечение, %			
		Al	Cu	Zn	Неметалл	Al	Cu	Zn	Неметалл
Алюминиевый	78	93,2	1,4	1,7	3,7	93,2	11,2	15,0	85,1
Медно-цинковый	22	24,1	39,4	34,2	2,3	6,8	88,8	85,0	14,9
Исходный	100	78	9,7	8,8	3,3	100	100	100	100

Согласно требованиям, предъявляемым используемым в США «Классификатором отходов», после сортировки автолома алюминиевый продукт должен содержать менее 5,5 % свободного цинка и железа, а также менее 5 % неметаллов. Этот продукт может поступать на металлургический передел. Извлечение алюминия в медно-цинковый продукт объясняется тем, что часть кусков лома представлена соединениями алюминия с другими металлами, например имеет не вывернутые стальные болты. При додрабливании этого продукта большая часть алюминия также может быть вовлечена в оборот.

После проведения контрольных опытов сепаратор был запущен в эксплуатацию. Заказчиком был организован процесс опробования и контроля алюминиевого лома, полученного при сепарации. Отобранная проба подвергалась покусковой ручной сортировке с разделением на следующие продукты: неметаллические компоненты,

нержавеющая сталь, цинк, медь и бронза, свинец, алюминиевые сплавы и куски, не разделенные дроблением. Определялась суммарное количество примесей в алюминиевом ломе, т.е. его кондиция. Кондиция полученного сепарацией алюминиевого продукта стабильно соответствовала требованиям. Результаты работы РСЭ-50 подтвердили возможность и целесообразность его использования для сортировки автомобильного и бытового лома немагнитных металлов. Стабильность технологических результатов обеспечена автоматическим управлением работой сепаратора.

Приведены результаты испытания сепаратора РСЭ-50 при обработке руды. Исследования проведены на керновых пробах хромовых руд Аганозерского месторождения общей длиной 63 м. Среднее содержание Cr_2O_3 по геологическим данным составляло 19,7%. Исходный материал крупностью -40+20 мм был получен дроблением кернов. Сепарация производилась с выделением трех продуктов: обогащенного, промпродукта и хвостов. При выделении хвостового продукта решалась задача получения в нем содержания Cr_2O_3 на уровне 5÷10%, при выделении обогащенного продукта – получения кускового концентрата с товарным содержанием. Результаты сепарации приведены в таблице 3. Из неконтрастной руды со средним содержанием Cr_2O_3 17,9% рентгеноспектральная сепарация позволяет выделить 40% хвостов с содержанием металла 6,2% (бортовое содержание данного месторождения 10%). Это позволяет увеличить содержание Cr_2O_3 в поступающей на обогащение руде в 1,4 раза или в 1,33 раза; в последнем случае дополнительно выделяется товарный кусковой концентрат с содержанием 32,6% окиси хрома.

Таблица 3. Результаты сепарации керновых проб хромовой руды

№	Наименование продукта	Масса, кг	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %		$\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$
				Cr_2O_3	FeO	Cr_2O_3	FeO	
Сепарация на три продукта								
1	Обогащенный	6	11,9	32,6	19,0	21,7	15,7	1,72
	Промпродукт	24,3	48,2	23,9	16,1	64,3	53,7	1,49
	Обедненный	20,1	39,9	6,2	11,1	13,9	30,6	0,57
Сепарация на два продукта								
2	Концентрат	30,3	60,1	25,6	16,6	86,1	69,4	1,54
	Хвосты	20,1	39,9	6,2	11,1	13,9	30,6	0,57
	Исходный	50,4	100	17,9	14,4	100,0	100,0	1,24

Выбор параметров настройки сепаратора для хромовых руд производился в соответствии с рекомендациями, изложенными в главах 2 и 3. При настройке производились изменения граничных порогов, анодного напряжения и тока РТ, а также уменьшение толщины фильтра РИ.

В **заклучении** диссертации сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

Основные результаты и выводы

В диссертационной работе достигнута заявленная цель, поставленные задачи решены. Результатом исследования является научное обоснование использования рентгеноспектрального метода в условиях покусковой сепарации для идентификации алюминиевых сплавов в ломе цветных металлов. Проведенные исследования позволили разработать рекомендации для создания промышленного автоматизированного рентгеноспектрального сепаратора.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем.

1. Создана физически обоснованная математическая модель измерительного канала рентгеноспектрального сепаратора и вычислительная программа для расчета по ней. С использованием модели выработаны рекомендации:

- по выбору метода вычисления аналитического параметра, характеризующего химический состав кусков лома;
- по выбору материала анода рентгеновских трубок и фильтрации излучения источника;
- по выбору анодного напряжения и тока рентгеновской трубки.
- по созданию рентгенооптической схемы в зависимости от крупности сепарируемого материала и разброса траектории устройством подачи кусков.

2. Предложена система автоматической подстройки чувствительности тракта регистрации обеспечивающая повышение точности определения аналитического параметра в условиях изменяющейся чувствительности детектора.

3. Предложена система управления острорезонансным вибропитателем, позволяющая уменьшить разброс траектории и использовать рентгеновский источник меньшей мощности, что снижает энергоемкости сепаратора.

4. С использованием рекомендаций создан промышленный рентгеноспектральный сепаратор с автоматизированной системой контроля и подстройки узлов. При испытаниях сепаратора РСЭ-50 в условиях заказчика («Camden Iron & Metal» Inc., США) доказана возможность решения поставленной заказчиком задачи с технологическими показателями обеспечивающими соответствие кондиции полученного в процессе сепарации алюминиевого лома техническим условиям, определяемым в США «Классификатором отходов» (Scrap Specifications Circular). Подтверждено стабильное и надежное функционирование всех узлов сепаратора при продолжительной эксплуатации. Металлургические испытания алюминиевых продуктов показали их пригодность для переплавки.

5. Показано, что область использования рекомендаций не ограничивается разделением лома цветных металлов и может быть расширена для переработки руд черных и цветных металлов, а также металлургических шлаков.

Опубликованные работы по теме диссертации в изданиях, определенных ВАК:

1. Новиков, В.В. Новая технология и оборудование для производства кварц-полевошпатовых концентратов / В.В. Новиков, С.А. Писарьков, С.В. Новиков // Обогащение руд. - 1998. - №5. - С. 20-24.
2. Новая технология и оборудование для переработки лома цветных металлов / В.Н. Тисенко, В.И. Аблязов, С.В. Новиков, С.А. Писарьков // Вестник машиностроения. – 2001. - №1. - С. 54-58.
3. Перспективы информационно-технологического развития процессов радиометрического обогащения полезных ископаемых / Т.В. Башлыкова, П.Б. Лагов, В.В. Новиков, С.В. Новиков, А.В. Корзакова // Цветные металлы. - 2007. - №3. - С. 52-54.
4. Новиков, В.В. Автоматизированные технологии для переработки руд черных и цветных металлов / В. В. Новиков, С. В. Новиков, А. В. Корзакова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 3. – С. 61-69.
5. Новиков, С.В. Инновационный проект создания технологии рентгеноспектральной сепарации отходов цветных металлов (математическая модель измерительного канала) / С. В. Новиков, В. Н. Тисенко // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Инноватика. - 2008. - № 3(56).- С. 146-152.
6. Новиков, С.В. Инновационные автоматизированные процессы рентгеноспектральной сепарации руд и лома цветных металлов / С. В. Новиков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. Инноватика. - 2009. – №5(87). - С. 298-303.

и в других изданиях

7. Новиков, С.В. Выбор детекторов рентгеновского излучения и компенсация нестабильности их параметров для рентгеноспектральной сепарации скрапа цветных металлов./ С. В. Новиков // Инновации в науке, образовании и производстве. Сборник трудов СПбГПУ.– 2002. – С. 179-184.
8. Пат. 2197329 Российская Федерация, МПК7 В03В13/06 Способ сортировки классифицированного минерального сырья и устройство для его осуществления / Новиков В.В, Новиков С.В.; заявитель и патентообладатель ООО «ЭГОНТ». – опубл. от 27.01.03.
9. Разработка технологии предварительного обогащения шлаков медного завода заполярного филиала ОАО “ГМК ”Норильский никель” на основе кусковой рентгеноспектральной сепарации и мелкопорционной сортировки/ Ю.В. Горшков, В.А. Ольховой, В.В. Новиков, С.В. Новиков, В.И. Лазарев, В.Б. Фомичев, С.В. Сухарев // IV конгресс обогатителей стран СНГ. Москва, 19-21 марта 2003 г. – М., 2003. – Т.3. - С.15-17.
- 10 Новиков, В.В. Разделение лома цветных металлов рентгеноспектральной сепарацией / В.В. Новиков, С.В. Новиков, А.В. Корзакова // Тезисы. V

Международный конгресс по управлению отходами и природоохранными технологиями ВейстТэк. Москва, 29 мая – 1 июня 2007 г. – М., 2007. – С. 182-183.

11. Alternative Exploitation Technology of Mineral Deposits/ V.V. Novikov, S.V. Novikov, A.V. Korzakova, V.I. Malahovskiy // 21st World Mining Congress & Expo 2008. Poland, Kraków, 7-12 september 2008. – Kraków, 2008. - P.77-85.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

ВП – вибропитатель

РИ – рентгеновское излучение

РТ – рентгеновская трубка