УДК 622.725
ББК 33.4
К55

*Книга соответствует «Гигиеническим требованиям к изданиям книжным для взрослых» СанПиН 1.2.1253—03, утвержденным Главным государственным санитарным врачом России 30 марта 2003 г.* (*ОСТ 29.124—94*). *Санитарно-эпидемиологическое заключение Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека № 77.99.60.953. Д.014367.12.14*

**Кобзев А.С.**

К55 Радиометрическое обогащение минерального сырья. — М.: Издательство «Горная книга», 2015. — 125 с.: ил. (Обогащение полезных ископаемых)

ISBN 978-5-98672-394-5

Рассмотрены методы радиометрического обогащения минерального сырья. Дано описание основных элементов оборудования для сепарации. Изложены последовательность работ и основы оценки обогатимости минерального сырья данной технологией. Приведен обзор и анализ развития рынка оборудования радиометрического обогащения. Большое внимание уделено опыту промышленного применения радиометрического обогащения на различных горнодобывающих и металлургических предприятиях.

Для инженерно-технических работников горно-обогатительных и металлургических предприятий, проектных и научно-исследовательских организаций. Может быть использована в учебном процессе профильных вузов.

ISBN 978-5-98672-394-5

УДК 622.725
ББК 33.4

© А.С. Кобзев, 2015
© Издательство «Горная книга», 2015
© Дизайн книги.
Издательство «Горная книга», 2015

# ПРЕДИСЛОВИЕ

*Памяти Л.М. Титова*

Одной из современных глобальных проблем является истощение минеральных ресурсов, в частности богатых и легкообогатимых руд. На этом фоне со стороны государства и недропользователей имеется запрос на применение новых технологий добычи и переработки, позволяющих повысить экономическую эффективность освоения как традиционных, так и техногенных месторождений.

Относительно новым направлением переработки твердых полезных ископаемых, которое позволяет решить эту проблему, является радиометрическое обогащение. Данная технология подразумевает два принципиально различных процесса: крупнопорционную сортировку — разделение руды в транспортных емкостях (вагонетках, автосамосвалах) и радиометрическую сепарацию — разделение материала крупностью от 300 до 0,5 мм на специальном оборудовании — радиометрических сепараторах.

Большинством ученых и специалистов, как отечественных, так и зарубежных, за технологией радиометрического обогащения признается огромный потенциал. Отечественными научно-исследовательскими институтами (ВИМС, ВНИИХТ, Механобр, ЦНИГРИ) накоплен огромный опыт лабораторных испытаний данной технологии на различных видах минерального сырья. В настоящее время данная технология активно развивается за рубежом как процесс переработки промышленных и бытовых отходов. Однако при оценке рисков внедрения радиометрического обогащения на горных предприятиях зачастую находятся скептики, основным аргументом которых против ее применения является малоизвестный опыт промышленного использования.

Ситуация осложняется из-за редких публикаций результатов использования технологии радиометрического обогащения и отсутствия обобщенного опыта промышленного применения данной технологии. Кроме того, компании-производители оборудования не всегда ведут учет опубликованных материалов, а также комплексный анализ результатов проведенных испытаний и опыта применения радиометрического обогащения, в связи с чем потенциальные потребители остаются в неведении о возможностях данной технологии.

Цель настоящей работы — раскрыть опыт применения технологии радиометрического обогащения различных видов сырья. Основной упор был сделан на радиометрические методы сепарации, так как технология крупнопорционной сортировки в транспортных емкостях является в большей степени методом контроля и управления качеством сырья, чем обогатительным процессом.

Автор выражает глубокую признательность первому наставнику Э.Г. Литвинцеву, а также В.К. Рябкину, В.В. Звереву и сотрудникам группы радиометрических методов обогащения ФГУП ВИМС. Автор благодарит А.М. Ольховского за идею данной работы, И.В. Чепрасова за ценные замечания, М. Бухареву, И. Силина, К. Степпуна за помощь в оформлении обложки.

# Глава 1

# ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО ОБОГАЩЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

## 1.1. ЗАДАЧИ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО ОБОГАЩЕНИЯ

Радиометрическое обогащение (*sensor-based sorting*) — группа методов переработки минерального сырья, базирующихся на взаимодействии различных видов излучений (рентгеновского, оптического и т.д.) с разделяемым материалом. Одной из самых распространенных задач данной технологии является предварительное обогащение материала, поступающего на последующие переделы. Реже решаются задачи получения товарной продукции, удаления из исходного сырья вредных примесей, а также разделения сырья на технологические типы.

В рамках решения наиболее распространенной технологической задачи — предварительного обогащения — применение технологии радиометрического обогащения позволяет разделить крупно- и среднедробленый материал на два потока: обогащенный полезным компонентом и отвальный. Возможны два варианта решения данной задачи: повышение качества сырья, поступающего на дальнейшую переработку, и удаление отвальных хвостов. Указанные варианты различаются критериями эффективности сепарации, что во многом определяет настройку оборудования.

В первом случае критерием эффективности радиометрического обогащения является удовлетворительное качество получаемого после радиометрической сепарации обогащенного продукта. Данный вариант пригоден для некондиционных руд, переработка которых традиционной технологией экономически не эффективна, в связи с чем потери полезного компо-

нента с отвальным продуктом радиометрического обогащения являются не столь критическими.

Вариант удаления отвальных хвостов используется при переработке кондиционных руд. В данном случае за критерий эффективности разделения принимается качество отвального продукта радиометрического обогащения, к которому предъявляются жесткие требования, связанные не только с экономическими соображениями недропользователя, но и требованиями государственных регуляторов в области охраны и рационального использования недр.

Задача получения товарной продукции с успехом решается при радиометрической сепарации угля, руд черных металлов, а также нерудного и неметаллургического сырья (калийные соли, магнезитовые руды и т.д.). При решении данной задачи радиометрическая сепарация позволяет полностью отказаться от обогащения традиционными технологиями либо ограничить их применение лишь классами крупности, не пригодными для сепарации — отсевом и крупной фракцией.

Также радиометрические методы сепарации позволяют решить задачу доведения качества сырья до требуемого уровня по содержанию вредных примесей. В частности, это актуально при переработке нерудного и неметаллургического сырья, а также при обогащении руд черных металлов (железные и марганцевые руды).

При разделении сырья на технологические типы исходный материал делится на потоки, переработка которых более эффективна по различным схемам обогащения. Например, в рамках решения данной задачи золотосодержащие руды могут разделяться на окисленные и сульфидные типы, а полиметаллические — на свинцовые, цинковые и т.д.

Применение радиометрического обогащения, как правило, оказывает существенное влияние на технико-экономические показатели освоения месторождения посредством увеличения объемов производства выпускаемой продукции, улучшения ее товарных качеств, повышения извлечения полезного компо-

нента на последующих этапах обогащения, снижения удельных капитальных и операционных затрат. Снижение себестоимости конечной продукции позволяет вовлекать в эксплуатацию руды, ранее считавшиеся забалансовыми. Таким образом, увеличиваются запасы месторождения, а также увеличивается срок работы горного предприятия.

Радиометрическое обогащение стабилизирует качество руды, поступающей на последующие переделы переработки [1], что также оказывает положительное влияние на технологические показатели обогатительного комплекса.

Учитывая, что радиометрическое обогащение находится на стыке добычного и обогатительного переделов, его внедрение открывает возможность изменения технологии ведения горных работ. В частности, появляется возможность замены сложной и затратной селективной выемки на более простую валовую.

При разработке месторождений, удаленных от обогатительной фабрики, применение радиометрической сепарации с решением задачи предварительного обогащения позволяет сократить нагрузку на доставку. Кроме того, появляется возможность реализации новой товарной продукции — щебня, инертных заполнителей, закладочного материала [2].

## 1.2. МЕТОДЫ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО ОБОГАЩЕНИЯ

Технология радиометрического обогащения подразумевает целый ряд разнообразных методов, базирующихся на взаимодействии практически всего спектра электромагнитных волн с горными породами и прочими материалами (шлаки, промышленные и бытовые отходы и т.д.).

В.А. Мокроусовым [3], А.П. Татарниковым [4] и Б.С. Лаговым [5] были предложены различные варианты классификации радиометрических методов обогащения и их названия. В данной работе будет использоваться терминология согласно классификации В.А. Мокроусова (табл. 1.1), за исключением рентгенофлюоресцентного метода, который в кругу отечест-

*Таблица 1.1*

**Классификация радиометрических методов обогащения**

| Метод разделения | Регистрируемый параметр | Область применения |
|---|---|---|
| Авторадиометрический | Интенсивность естественного гамма-излучения | Урановые и редкометалльные руды |
| Рентгеноабсорбционный | Интенсивность прошедшего рентгеновского излучения сквозь материал | Универсальный метод |
| Рентгенорадиометрический | Характеристическое излучение элементов | То же |
| Рентгенолюминесцентный | Интенсивность и цвет люминесценции минералов, возбужденной рентгеновским излучением | Люминесцирующие минералы: алмазы, шеелит, флюорит и т.д. |
| Фотометрический | Оптические свойства материала (цвет, прозрачность) | Универсальный метод |
| Ближнеинфракрасный | Отражение и поглощение в ближнем инфракрасном диапазоне | Нерудное и неметаллургическое сырье |
| Инфракрасный | Теплоемкость руды и породы | Руды черных металлов |
| Электромагнитный | Изменение напряженности и энергии магнитного и электрического полей | Сульфидные руды |

венных специалистов более известен как рентгенорадиометрический.

В классификации В.А. Мокроусова группа процессов сепарации, основанных на взаимодействии радиоволн с веществом, включает в себя четыре метода: индукционный радиорезонансный, емкостной радиорезонансный, радиоабсорбционный и магнитометрический. Вместе с тем в работе [3] отмечается, что признаки разделения индукционного радиорезонансного и емкостного радиорезонансного методов базируются на изменении энергии электромагнитного поля, а индукционный радиорезонансный и радиоабсорбционный методы основаны на различии электрической проводимости разделяемого материала. Современные сепараторы, использующие в качестве

разделительного признака взаимодействие материала и радиоволнового излучения, позволяют одновременно определять сразу несколько из перечисленных свойств, что, по нашему мнению, обусловливает нецелесообразность их разделения. По аналогии с англоязычным термином *electromagnetic sorting* в настоящей работе будет употребляться термин «электромагнитная сепарация».

***Авторадиометрический метод*** (радиометрический метод, *radiometric sorting*) основан на регистрации интенсивности естественного гамма-излучения руды. Различают два метода регистрации гамма-излучения: метод счета, когда определяется число импульсов, зарегистрированных в равные промежутки времени, и метод скорости счета, при котором определяется частота возникновения импульсов без выделения временных интервалов. Метод счета числа импульсов является более точным, тогда как метод скорости счета проще [6]. Авторадиометрический метод применяется для руд, которые имеют естественную радиоактивность.

***Рентгеноабсорбционный метод*** (рентгенотрансмиссионный, *X-Ray transmission sorting, XRT sorting*) базируется на различии ослабления рентгеновского излучения отдельными элементами и соединениями. В общем виде можно представить, что чем выше атомный номер элементов, входящих в состав минералов и горных пород, тем меньшее количество рентгеновских лучей пройдет сквозь данный материал. Рентгеноабсорбционный метод является проникающим и позволяет перерабатывать руду со скрытой минерализацией. Этот метод достаточно универсален и применяется при обогащении руд цветных металлов, золота, углей.

Существенно ограничивает возможность применения метода разрешающая способность детекторов. Современные регистрирующие системы позволяют определять включения площадью более 3×3 мм.

***Рентгенорадиометрический метод*** (рентгенофлюоресцентный, рентгеноспектральный, гамма-флюоресцентный, *X-Ray*

*fluorescence sorting*, *XRF sorting*) основан на возбуждении атомов определяемых элементов с помощью источников ионизирующего излучения, в качестве которых могут выступать рентгеновские трубки и радионуклидные источники, и анализе спектрального состава характеристического рентгеновского излучения возбужденных атомов [7]. Метод пригоден для определения элементов с атомным номером $Z > 16$.

Рентгенорадиометрический метод базируется на следующих двух принципах. Связь между энергией характеристического рентгеновского излучения каждого элемента $\varepsilon_x$ и его атомным номером $Z$ определяется законом Мозли, где $\sqrt{\varepsilon_x} \sim Z$. Следовательно, энергия характеристических рентгеновских линий каждого элемента заведомо известна, а интенсивность линий зависит от массовой доли элемента в исследуемом объеме [8]. Метод может быть как прямым, например, при определении непосредственно содержания извлекаемого элемента, так и косвенным — при сепарации золотосодержащих руд, когда разделение производится по элементам-спутникам (мышьяк, железо).

***Рентгенолюминесцентный метод*** (*X-Ray luminescence sorting*, *XRL sorting*) основан на том, что отдельные минералы под воздействием рентгеновского излучения способны испускать свечение — люминесцировать [9]. Метод применяется для руд, содержащих люминесцирующие минералы, например для вольфрамовых руд и алмазного, апатитового и флюоритового сырья.

В целом, люминесценция является преобразованием одного вида энергии, как, например, ядерного, оптического, рентгеновского излучения или механического воздействия, в световое излучение. Для некоторых руд возможно применение данного метода, но с возбуждением люминесценции не рентгеновским, а ультрафиолетовым излучением. Тогда метод называется люминесцентным.

***Фотометрический метод*** (оптический, цветной, *optical sorting*, *color sorting*, *photometric sorting*) основан на регистрации

различий оптических характеристик разделяемых частиц, таких как цвет и прозрачность. Метод весьма универсален и применяется для большинства видов минерального сырья, при переработке отходов, а также сельскохозяйственных культур. В целом данная технология является аналогом ручной рудоразборки на основе визуального осмотра с той лишь разницей, что использование в современных сепараторах электронных систем регистрации и обработки сигналов позволяет разделять материал более качественно, селективно и с высокой производительностью.

В современной зарубежной литературе фотометрический метод обозначается как *optical sorting*, однако возможно употребление и иных терминов. Первые монохромные фотометрические сепараторы, которые были способны различать лишь черный и белый цвета, а также некоторое количество серых оттенков, обозначались как *photometric sorters*. Современные фотометрические сепараторы, которые позволяют различать более 300 тыс. различных цветов и оттенков, определяются как *color sorters*. В отечественной литературе аналогом термину *color sorting* был предложен термин «полихромная фотометрическая сепарация» [10], однако широкого распространения он не получил.

***Ближнеинфракрасный метод*** (*NIR sorting*) базируется на определении различия взаимодействия электромагнитного излучения в ближнем инфракрасном диапазоне с молекулами поверхности материала. Этот метод дает возможность регистрировать наличие следующих соединений в составе материала: OH, $H_2O$, $CO_3$, $NH_4$, FeOH, MgOH, AlOH. Это позволяет осуществлять сепарацию по наличию глинозема, хлорита, серпентина, эпидота, амфиболита, ярозита, гипса, кальцита, доломита, магнезита, родохрозита, алунита. Доказана возможность применения метода для отделения барита и флюорита от кальцита и доломита, а также для выделения непродуктивных фракций при переработке мрамора, талька и боратов [11].

***Инфракрасный метод*** (*IR sorting*) основан на различии разделяемых компонентов, слагающих руду и породы, в интенсивности испускаемого инфракрасного излучения. Возбуждение инфракрасного излучения осуществляется путем нагрева материала СВЧ-источниками. Метод базируется на различии теплоемкости рудных минералов и горных пород. Данная технология может применяться для руд черных металлов.

***Электромагнитный метод*** (радиоабсорбционный, индукционный радиорезонансный, емкостной радиорезонансный, магнитометрический, *electromagnetic sorting*) основан на различии электрических и магнитных свойств рудных и породных компонентов. Характер взаимодействия радиоволн с горными породами определяется их электрическими и магнитными свойствами. В качестве разделительных признаков электромагнитного метода могут использоваться различия в электропроводности, диэлектрической проницаемости, магнитной проницаемости и магнитной восприимчивости [3].

Электромагнитные свойства минералов, руд и пород зависят от минерального и химического составов, структуры и текстуры, влажности и пористости материала, а также частоты воздействующего электромагнитного поля.

Метод применяется для предварительного обогащения руд цветных металлов, где полезный компонент связан с сульфидами. Экспериментально доказана возможность применения при обогащении высокозольных углей [12, 13].

## 1.3. СРАВНЕНИЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО ОБОГАЩЕНИЯ И РУЧНОЙ РУДОРАЗБОРКИ

При рассмотрении вопроса внедрения радиометрического обогащения как на зарубежных, так и на отечественных горнодобывающих предприятиях менеджмент компаний зачастую сопоставляет данную технологию с ручной рудоразборкой. При этом предполагается, что ручная рудоразборка требует меньших капитальных затрат.

Отметим три причины, по которым предположение о бóльшей эффективности ручной рудоразборки чаще всего является ошибочным.

Во-первых, это высокая стоимость и низкая производительность ручного труда. Ручная рудоразборка применяется при небольших перерабатывающих мощностях обогатительного передела и высокой стоимости ценного компонента, например при переработке пород, содержащих драгоценные камни (изумруды, алмазы), при отборе оптического флюорита, горного хрусталя и богатых золотосодержащих руд. В связи с повышением стоимости труда в последние годы отмечается уменьшение количества предприятий, на которых применяется ручная рудоразборка. Исключение составляют развивающиеся страны Африки и Юго-Восточной Азии, где на некоторых мелких горных предприятиях данная технология применяется и в настоящее время.

При меньших капитальных затратах ручная рудоразборка характеризуется существенно бóльшими операционными расходами, так как производительность труда одного рудоразборщика по отбираемому материалу в смену не превышает 8 т для класса крупности –300 мм и 1,5 т/см для класса крупности –40+20 мм [14]. Таким образом, при продолжительности смены 8 ч и коэффициенте использования оборудования 0,7 на классе крупности –200+100 мм один радиометрический сепаратор способен переработать более 1000 т материала. Для ручной разборки данного объема, при условии выбраковки 10% материала и продолжительности смены 8 ч, потребуется 13 рабочих. В случае, если необходимо будет выбраковывать 50% материала, потребуется 63 рабочих.

В работе [15] приведен пример сопоставления технико-экономических показателей ручной рудоразборки и фотометрической сепарации магнезитовых руд (табл. 1.2). Согласно данному примеру, годовая выручка при ручной рудоразборке имеет отрицательное значение, а использование фотометри-