

УДК 57.088.52

Н. Н. Потрахов, Е. Д. Холопова, А. Ю. Грязнов, Н. Е. Староверов,
А. А. Александрова, К. К. Гук, И. М. Баранов, Р. А. Бахтиев
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Исследование рентгенооптической схемы и режимов работы рентгенофлуоресцентного сепаратора золота

Рассмотрены вопросы практической реализации рентгенофлуоресцентного способа сепарации золото-содержащих руд. Показано, что с учетом постепенной выработки богатых месторождений современные методы становятся все менее рентабельными и для повышения экономической эффективности золотодобычи необходимо внедрять в процесс новые технологии. Сравнение технических характеристик показало, что рентгенофлуоресцентный способ имеет преимущество перед рентгеноабсорбционным – как ввиду принципиальных физических ограничений последнего, так и ввиду несовершенства технических средств (источников и приемников излучения). Приведены результаты макетирования отдельных узлов и блоков сепаратора, позволившие оценить его основные параметры, представлены результаты расчетов, связанных с оптимизацией чувствительности метода и предела обнаружения золота в породе. Предварительная оценка эффективности метода показывает, что внедрение технологии предварительного обогащения золотосодержащих руд позволит существенно снизить стоимость добычи за счет исключения необходимости дробления всего объема перерабатываемой руды.

Обогащение золотосодержащих руд, рентгенофлуоресцентный анализ, спектральный состав, оптимизация первичного излучения

Поскольку существующие методы извлечения золота из породы достигли своего технического предела, а все более или менее «богатые» месторождения золота (с концентрацией золота выше нескольких грамм на тонну) исчерпаны и в распоряжении добытчиков остаются хотя и обширные, но все более трудоемкие для освоения месторождения, возникла необходимость создания новой техники и технологий добычи. Анализ ситуации, сложившейся в настоящее время на мировом рынке добычи золота, показывает, что назрела проблема разработки и внедрения в практику отечественных конкурентоспособных приборов, а потенциальными потребителями разрабатываемого комплекса станут горнодобывающие и геолого-разведывательные предприятия.

Большинство известных способов добычи золота основано на непосредственном извлечении металла из руды (в основном, гравитационным методом, без предварительного обогащения). Для обогащения остаточной породы используют способы извлечения золота из руды посредством амальгамирования и/или выщелачивания цианидом натрия. В обоих случаях недостатком оказывается

сложный процесс очистки сточных вод вследствие высокой ядовитости отходов производства.

Во всех способах извлечения золота (в том числе и в гравитационном) требуется достаточно дорогостоящее измельчение породы – в зависимости от богатства месторождения, крупности золота стоимость дробления составляет до 60 % себестоимости добычи.

Идея сепарации веществ на основе различных эффектов взаимодействия с ними рентгеновского излучения уже хорошо зарекомендовала себя в разных областях промышленности. В настоящее время сепарация успешно применяется в агропромышленности, при добыче алмазов, обогащении полиметаллических руд и иных продуктов. Однако на данный момент не существует методики сепарации золота с использованием рентгеноабсорбционного или рентгеноспектрального анализа – это связано с целым рядом факторов: недостаточным уровнем чувствительности детекторов, несовершенством методов обработки сигналов, отсутствием эффективного быстродействующего механизма (шибер или пневмоотсекателя) для разделения пустой породы и концентрата при требуемой крупности помола и т. д.

В целом создание рентгеноспектрального сепаратора золотой руды предполагает решение следующих задач:

- разработку методики рентгеновского контроля породы рентгеноабсорбционным и/или рентгеноспектральным методом (схема съемки, требования к источнику и приемнику излучения, режимам их работы и т. д.);

- оценку предельных возможностей комплекса по извлечению частиц золота различной крупности в идеальных и реальных условиях;

- разработку программного комплекса управления сепаратором, в том числе определение оптимального набора технических средств рентгеновского контроля, включая алгоритмы и программное обеспечение;

- разработку и изготовление действующего макета сепаратора.

На данный момент на базе поисковых работ в области сепарации различных руд опубликованы результаты исследования возможностей рентгеноабсорбционного способа оценки количественного содержания самородного золота в руде [1], получен патент на способ оценки содержания золота в породе [3] и свидетельство на программу по определению содержания золота в породе [2]. Показанные в публикациях результаты подтверждают высокую перспективность внедрения методики рентгеноабсорбционного рентгеноспектрального анализа в процесс обогащения золотых руд.

Однако быстрдействие рентгеночувствительных ПЗС-линеек, позволяющих получать изображение частиц золота в породе, не позволяет в настоящее время реализовать сепарацию руды в промышленном масштабе, и более перспективным представляется использование рентгеноспектрального метода сепарации.

Реализация работы комплекса может быть описана следующим образом (рис. 1). Предварительно раздробленная порода подается транспортером в область анализа, где облучается веерным пучком излучения. Система регистрации (спектрометр) регистрирует сигнал и в случае получения пика характеристического излучения от золота (для спектрального метода) передает его в блок управления, который формирует сигнал на пневмоотсекатель, сдувающий сегмент породы с облученной частицей.

Наиболее важный фактор, определяющий характеристики сепаратора, – это его рентгеноопти-

ческая схема, описывающая взаиморасположение источника излучения, анализируемого объекта и детектора.

Зачастую также к параметрам рентгенооптической схемы относят спектральный состав первичного излучения, определяемый материалом анода рентгеновской трубки, ее рабочим напряжением и током, а также, при наличии, толщиной и материалом первичного фильтра, и параметры вторичного фильтра (естественно, также в случае его наличия).

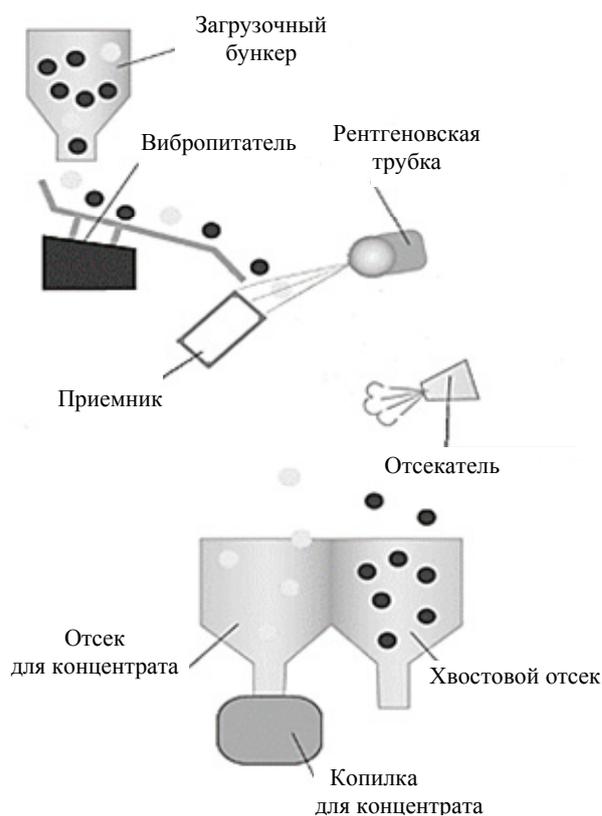


Рис. 1

В случае реализации схемы рентгеноспектрального сепаратора золота в породе необходимо учитывать тот факт, что анализируемый объект представляет собой не сплошную поверхность анализируемого материала, а куски породы, перемещающиеся по наклонной плоскости (поддону), чаще всего с некоторым расстоянием между ними; следовательно, большую часть времени в детектор будет попадать не только вторичное характеристическое излучение от кусков породы или частиц золота, но и характеристическое излучение от поддона. При этом, естественно, детектор все время будет регистрировать фоновый спектр первичного излучения от рентгеновской трубки, рассеянного на тех или иных элементах рентгенооптической схемы.

Использование газового пропорционального детектора представляется наиболее предпочтительным, поскольку энергетическое разрешение сцинтилляционного детектора невозможно из-за его низкого разрешения, а полупроводникового – из-за его низкой скорости счета импульсов. При разработке требований к рентгенооптической схеме должны быть выполнены следующие условия:

- максимальное возбуждение L-серии золота в породе;

- отсутствие наложения рассеянного излучения характеристических линий материала анода на L-сериию золота;

- минимизация рассеянного фона первичного тормозного излучения в спектральной области регистрации L-серии золота.

По сути задача сводится к нахождению некоего максимума функции, зависящей от нескольких параметров – контрастности аналитической линии (соотношения ее интенсивности к фону), ее абсолютной интенсивности (определяющей скорость принятия решения системой обработки информации), быстродействием регистрирующей системы в целом и исполнительных механизмов отсечки породы.

В ходе предыдущих поисковых исследований в области рентгеноспектрального анализа и создания источников рентгеновского излучения авторами была разработана программа, позволяющая моделировать спектр первичного излучения рентгеновской трубки с учетом варьирования ее конструктивных и электрических параметров. Возможность изменения типа и материала анода, материала оболочки и выпускного окна, тока и напряжения трубки, дополнительная фильтрация

первичного излучения позволяют моделировать режимы работы источника рентгеновского излучения в широких диапазонах характеристик [4].

Естественно, существует набор очевидных требований к рентгенооптической схеме съемки и источнику излучения – максимальная мощность трубки (определяемая током), максимально сближенная геометрия съемки. Аналогично, от детектора рентгеновского излучения требуется высокая скорость счета в диапазоне регистрируемых энергий квантов и максимально достижимое разрешение. Эти параметры определяются техническими и экономическими возможностями.

Важным вопросом моделирования является определение материала анода и рабочего напряжения трубки. Поскольку наиболее яркие аналитические линии L-серии золота имеют энергии 9.7 и 11.4 кэВ, то, в связи с не самым высоким энергетическим разрешением газового пропорционального детектора, использование традиционного вольфрама (энергия линии L-серии – 8.4 и 9.7 кэВ соответственно) в качестве материала анода представляется нецелесообразным (на рис. 2 представлены спектры излучения трубки с вольфрамовым анодом в программе «Спектрон» [4]: 1 – напряжение 25 кэВ; 2 – напряжение 50 кэВ). В данном случае интенсивность рассеянного характеристического излучения материала анода будет сопоставима с аналитическим сигналом от малых концентраций золота, что приведет к невозможности его точной регистрации. В связи с этим оптимальным является использование трубки с анодом из родия Rh (K α -линия – 20.2 кэВ) или серебра Ag (K α -линия – 22.1 кэВ).

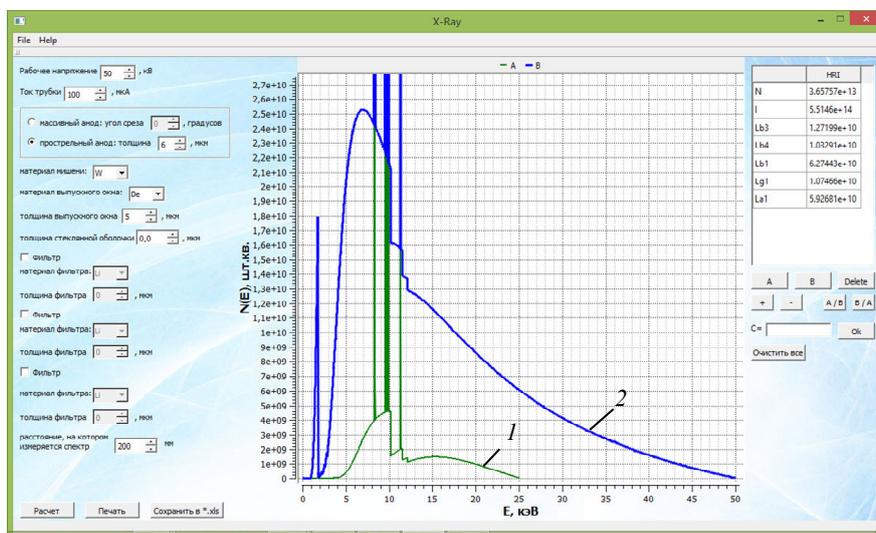


Рис. 2

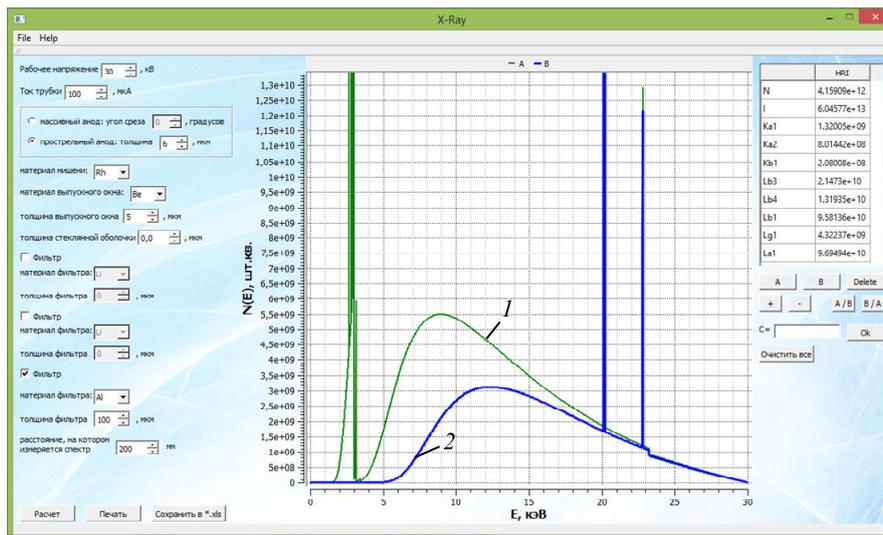


Рис. 3

Согласно общей теории возбуждения первичного характеристического излучения, что подтверждается расчетами с помощью разработанной программы, оптимальным рабочим напряжением трубки в таком случае будет 30...35 кВ.

Однако такое рабочее напряжение трубки приведет к достаточно большому фону рассеянного тормозного излучения в области регистрации аналитических линий золота и, значит, к необходимости фильтра первичного излучения.

Представленные на рис. 3 результаты (спектры излучения трубки с родиевым анодом в программе «Спектрон» [4]: 1 – без использования фильтра; 2 – с фильтром) показывают, что применение фильтра из алюминия толщиной 100 мкм, позволяющего в три-пять раз снизить интенсивность рассеянного излучения под аналитическими линиями золота, даст возможность в два раза повысить контрастность аналитической линии и, следовательно, предел обнаружения элемента.

Кроме того, при регистрации спектра излучения необходимо учитывать тот факт, что порода представляет собой не сплошной поток, а отдельные куски (с заданной крупностью), т. е. в детектор может попадать характеристическое излучение от поддона или лотка, по которому порода перемещается. В связи с этим для материала поддона необходимо использовать химические элементы, характеристические линии которых детектор уверенно отличает от линий L-серии золота.

Проведенное моделирование показало, что с учетом энергетического разрешения детектора в качестве материала поддона (лотка), в котором перемещается порода, практически единственным выбором остается титан (удовлетворяющий



Рис. 4

требованиям и по износостойкости, и по вкладу в спектр регистрируемого детектором рентгеновского излучения).

Результаты расчета позволили сформулировать требования к макету рентгенолюминесцентного сепаратора (рис. 4), а предварительные экспериментальные результаты показали обоснованность расчета его аналитических и эксплуатационных характеристик. Спектральное распределение интенсивности излучения позволяет уверенно распознавать сигнал от частиц золота.

Полученные результаты показывают принципиальную возможность создания рентгенолюминесцентного сепаратора золотосодержащей породы, обеспечивающего извлечение частиц золота размером от 0.3 мм из руды с крупностью кусков не более 10 мм. При мощности источника излучения от 500 Вт и скорости счета газового пропорционального детектора до 10^{-6} имп/с на одном потоке может быть обеспечена производительность до нескольких тонн в час.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ оценки количественного содержания самородного золота в руде / Н. Н. Потрахов, А. Ю. Грязнов, К. К. Жамова, Н. Е. Староверов, Е. Д. Холопова // Машиностроитель. 2016. № 1. С. 39–43.

2. Пат. 2595826 РФ МПК G 01 N 23/083 (2006.01). Способ определения количественного содержания самородного золота в руде / Н. Н. Потрахов, А. Ю. Грязнов, К. К. Жамова, В. Б. Бессонов, Н. Е. Староверов, Е. Д. Холопова; заявитель и патентообладатель СПбГЭТУ «ЛЭТИ». № 2015131375/28; заявл. 28.07.2015; опубл. 27.08.2016. Бюл. № 24.

3. Пат. 2015660387 РФ. Программа для определения содержания золота в породе «Goldfinger» / А. Ю. Грязнов, К. К. Жамова, Н. Н. Потрахов, Н. Е. Староверов, Е. Д. Холопова, О. В. Терентьева; заявитель и патентообладатель СПбГЭТУ «ЛЭТИ». № 2015617233; заявл. 03.08.2015; опубл. 20.10.2015.

4. Пат. 2014618547 РФ. Программа для моделирования спектров излучения «Спектрон» / Е. Д. Холопова, В. Б. Бессонов, А. Ю. Грязнов, К. К. Жамова, А. О. Лившиц, Е. С. Кунашик; заявитель и патентообладатель СПбГЭТУ «ЛЭТИ». № 2014616352; заявл. 01.07.2014; опубл. 20.09.2014.

N. N. Potrakhov, E. D. Kholopova, A. Yu. Gryaznov, N. E. Staroverov,
A. A. Aleksandrova, K. K. Guk, I. M. Baranov, R. A. Bakhtiev
Saint Petersburg Electrotechnical University

RESEARCH AND OPTIMIZATION OF CHARACTERISTICS OF THE X-RAY FLUORESCENT SEPARATOR OF GOLD

The article deals with the practical implementation of the X-ray fluorescence method for the separation of gold-bearing ores. Modern methods are becoming less and less profitable given the gradual development of rich deposits. To increase the economic efficiency of gold mining, it is necessary to introduce new technologies into the process. Comparison of technical characteristics showed that the X-ray fluorescence method has an advantage over the X-ray absorption method. In view of the fundamental physical limitations of the latter and because of the imperfection of technical means (sources of radiation and detectors). The paper shows the results of prototyping individual units and separator blocks, which allowed to evaluate its main parameters, presents the results of calculations related to the optimization of sensitivity of the methods and the limit of detection gold in the rock. A preliminary assessment of the effectiveness of the method shows that the use of a technology for preliminary concentration of gold-bearing ores will significantly reduce the cost of mining by eliminating the need for crush the entire volume of processed ore.

Enrichment of gold-bearing ores, x-ray fluorescence analysis, spectral composition, optimization of primary radiation