

## СЕПАРАТОР ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МЕЧЕННЫХ НЕЙТРОНОВ

*В. Ю. Алексахин<sup>а,б</sup>, Е. И. Андреев<sup>а</sup>, И. К. Комаров<sup>а</sup>,  
Е. А. Разинков<sup>а,б</sup>, Ю. Н. Рогов<sup>а,б,1</sup>, М. Г. Сапожников<sup>а,б</sup>*

<sup>а</sup> ООО «Диамант», Дубна, 141980, Россия

<sup>б</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

Разработан сепаратор для обогащения железной руды, движущейся на конвейере, в режиме реального времени. Для определения элементного состава руды используется метод меченых нейтронов. В качестве источника нейтронов применяется портативный нейтронный генератор ИНГ-27. Регистрация  $\gamma$ -квантов характеристического излучения осуществляется 14  $\gamma$ -детекторами на основе кристалла ВГО. Разделение руды на обогащенный продукт и хвосты осуществляется шибберным устройством, управляемым нейтронным анализатором, который в online режиме производит измерение элементных концентраций руды и при требуемых значениях выработывает сигнал на поворот шибера. Обсуждаются результаты работы сепаратора.

A separator for the real-time beneficiation of iron ore on a conveyor belt has been developed. The method of tagged neutrons is used to determine the elemental composition of ore. A portable neutron generator ING-27 is used as a neutron source. Registration of  $\gamma$  quanta of characteristic radiation is carried out by 14  $\gamma$  detectors based on BGO crystal. Separation of ore into marketable product and tailings is implemented by a gate device controlled by neutron analyzer signals, which checks online the compliance of elemental concentrations of ore with the required values. The results of the separator operation are discussed.

PACS: 28.20.-v; 81.70.Tx

### ВВЕДЕНИЕ

Задача сортировки материалов, движущихся на конвейере, на основе знания элементного состава вещества, актуальна в самых разных областях горнодобывающей, угольной, металлургической и цементной промышленности. Как правило, основная задача сортировки в горнодобывающей промышленности — отделить богатую руду от бедной, у которой концентрация полезного элемента ниже приемлемой. Условием сортировки может являться также ограничение на концентрацию экологически опасного вещества, например, на концентрацию серы в железной руде.

Метод меченых нейтронов (ММН) широко используется для дистанционного неразрушающего анализа элементного состава различных объектов [1–4]. В настоящей статье обсуждаются результаты работы сепаратора на основе ММН для обогащения железной руды, движущейся на конвейере.

---

<sup>1</sup>E-mail: yrogov@diamant-sk.ru

## 1. МЕТОД МЕЧЕНЫХ НЕЙТРОНОВ

Метод меченых нейтронов основан на облучении исследуемого образца быстрыми нейтронами с энергией 14,1 МэВ, образующимися в результате реакции



В этой бинарной реакции ядро  ${}^4\text{He}$  ( $\alpha$ -частица) и нейтрон разлетаются практически в противоположные стороны. Поэтому, регистрируя направление импульса  $\alpha$ -частицы, можно определить направление импульса нейтрона. Такая процедура называется мечением нейтронов (рис. 1).

Быстрые нейтроны с энергией 14,1 МэВ, в основном, за счет реакций неупругого рассеяния типа  $(n, n'\gamma)$  возбуждают ядра исследуемого вещества. Это возбуждение снимается  $\gamma$ -излучением, характерным для каждого химического элемента, что делает возможным его идентификацию.

Регистрация  $\gamma$ -квантов осуществляется только внутри окна совпадений, которое открывается в момент появления сигнала от  $\alpha$ -частицы в  $\alpha$ -детекторе. Таким образом отбираются только те  $\gamma$ -кванты, которые испущены ядрами исследуемого вещества при взаимодействии с мечеными нейтронами. В результате, по сравнению со стандартными методами нейтронного анализа, соотношение сигнал/фон в ММН возрастает почти в 200 раз.

В сравнении с рентгеновскими методами, которые дают сведения только об элементном составе поверхностного слоя вещества толщиной в несколько миллиметров, ММН имеет большую проникающую способность и позволяет проводить анализ материала на ленте конвейера толщиной до 300 мм. Этим ММН выгодно отличается от рентгеновских методов.

В настоящее время анализаторы на основе ММН [1–4] позволяют определять концентрации 25 элементов: Na, Mg, N, C, O, F, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Zr, Pb, Sn, Bi, Sb.

ММН дает уникальную возможность прямого определения концентрации легких элементов — углерода, азота, фосфора, кислорода и серы. Благодаря знанию кон-

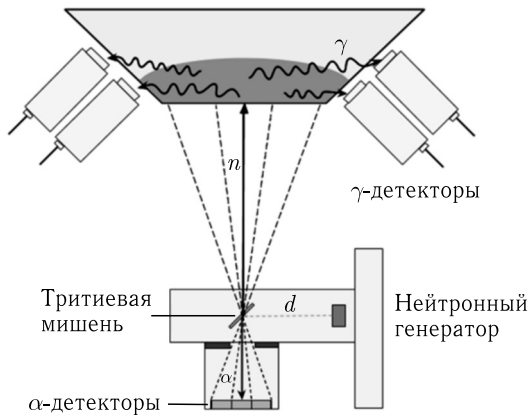


Рис. 1. Схема метода меченых нейтронов

центрации кислорода возможно определять концентрации элементов в сырье любой влажности.

## 2. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ РАБОТЫ

Общая схема сепараторного комплекса показана на рис. 2.

Сепаратор состоит из нейтронного модуля, шкафа управления, компьютера оператора с установленным математическим обеспечением и модуля сепарации руды. Нейтронный модуль располагается между ветвями конвейера. Он включает в себя нейтронный генератор со встроенным детектором  $\alpha$ -частиц и детекторы  $\gamma$ -излучения, которые регистрируют характеристическое  $\gamma$ -излучение, возникающее при облучении движущегося на конвейере вещества потоком меченых нейтронов.

Шкаф управления нейтронным модулем содержит источники питания нейтронного генератора,  $\alpha$ -детектора, детекторов  $\gamma$ -излучения, систему анализа данных, выполненную с возможностью сбора и анализа данных, получаемых от  $\alpha$ - и  $\gamma$ -детекторов. Модуль сепарации руды состоит из опорной рамы, на которой установлен разветвитель и соединенные с ним отводящие рукава, причем внутри разветвителя размещен перекидной шибер с приводом переключения.

Нейтронный модуль состоит из портативного нейтронного генератора ИНГ-27 со встроенным 9-пиксельным  $\alpha$ -детектором, системы из 14  $\gamma$ -детекторов на основе кристалла ВГО и защиты  $\gamma$ -детекторов.

Портативный нейтронный генератор ИНГ-27 излучает нейтроны с энергией 14,1 МэВ. Интенсивность нейтронного пучка составляла  $I = 5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ . Встроенный кремниевый  $\alpha$ -детектор представлял собой матрицу  $3 \times 3$  с размером пикселя  $10 \times 10 \text{ мм}$ .

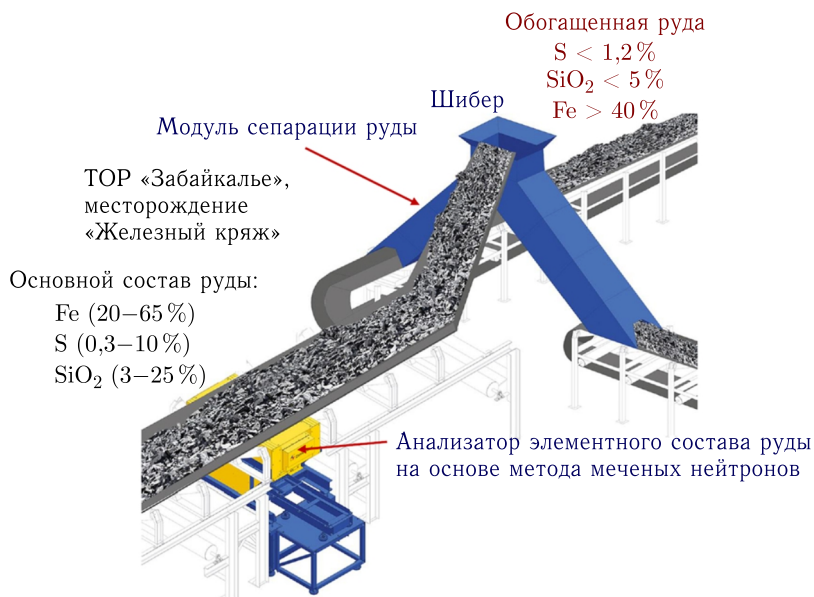


Рис. 2. Общая схема сепаратора

Для регистрации  $\gamma$ -квантов, возникающих при облучении минерального сырья пучком быстрых меченых нейтронов, использовались 14  $\gamma$ -детекторов на основе кристаллов ВГО диаметром 76 мм и толщиной 65 мм. Детекторы  $\gamma$ -квантов на основе ВГО, применяемые на установке, имеют достаточно хорошее энергетическое разрешение, не хуже 10% на линии  $E_\gamma = 662$  кэВ от радиоактивного источника  $^{137}\text{Cs}$ .

Энергетическое разрешение всей системы детекторов составило  $\Gamma_E = (4,42 \pm 0,14)\%$  на линии 4,44 МэВ. Временное разрешение системы ( $\alpha$ - $\gamma$ )-совпадений, усредненное по всей совокупности  $\gamma$ -детекторов, составило  $\Gamma_t = (4,82 \pm 0,12)$  нс.

На рис. 3 показано, как выглядит нейтронный модуль, установленный в сепарационном комплексе месторождения «Железный кряж» в Забайкальском крае. Для защиты от воздействия прямых осадков нейтронный модуль расположен в отдельной пристройке, через которую проходят линии конвейера. Температура внутри пристройки не отличается от внешней и может достигать  $-30 \div -35^\circ\text{C}$ . На фото видно, что внутри пристройки лежит снег.



Рис. 3. Нейтронный модуль сепаратора

Цикличность обновления данных по элементному составу — 1 раз в 90 с. Управление сепарацией осуществляется с помощью ПК. Анализатор определяет в руде, проходящей по конвейеру, массовые концентрации следующих химических элементов: S, O, Al, Si и Fe. На их основе рассчитываются концентрации соответствующих оксидов.

Нейтронный модуль выдает управляющий сигнал для узла сортировки потоков материала при прохождении руды с массовой концентрацией в соответствии с данными, приведенными в табл. 1. Богатая руда должна удовлетворять выполнению всех трех условий, приведенных в столбце «Массовая концентрация» табл. 1.

Таблица 1. Точности определения массовой концентрации элементов

Элемент	Диапазон массовых концентраций, %	Массовая концентрация, %, Не более	Вероятность, %
S	0,3–5,0	Не более 1,2	95
Fe	20,0–65,0	Не менее 40	95
SiO <sub>2</sub>	3,0–25,0	Не более 5	95

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 4 приведен энергетический спектр  $\gamma$ -квантов железной руды при облучении мечеными нейтронами.  $\gamma$ -спектр каждого образца раскладывался на отдельные составляющие путем подгонки его суммой опорных  $\gamma$ -спектров от элементов, входящих в состав образца. Все спектры исходных элементов S, O, Al, Si, и Fe были из-

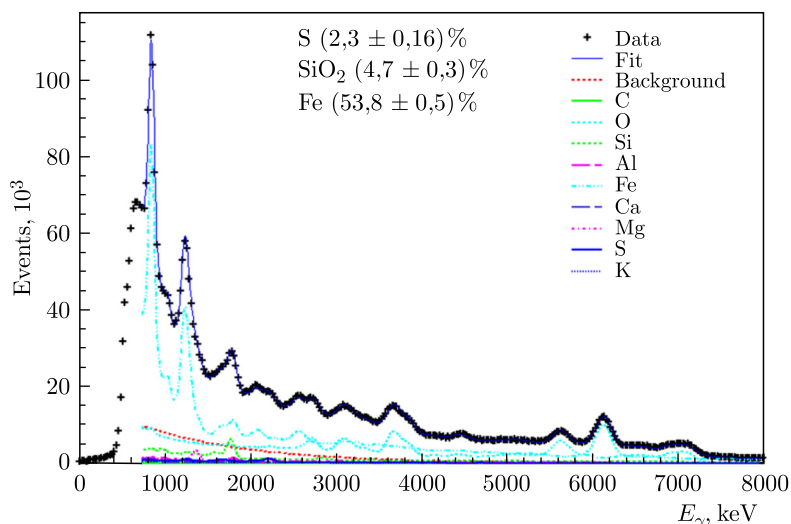


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Энергетический спектр  $\gamma$ -квантов образца магнетита. Сплошная черная линия — сумма вкладов всех элементов. Вклады отдельных элементов показаны цветом: кислорода — голубым, углерода — зеленым, серы — синим. Крестиками показаны экспериментальные данные

меры предварительно. Обработка спектров проводилась по методике, которая была подробно изложена в [5, 6].

Хорошо видны яркие пики Fe при 849 и 1220 кэВ, пик кремния при 1320 кэВ и много кислородных линий. Вклад от серы, в силу ее малой концентрации, не выглядит в спектре четкой линией. Наоборот, чтобы правильно выделять серу, необходимо тщательно измерять опорные спектры от всех образцов и проводить градуировку.

На рис. 5 приведены результаты измерений градуировочных проб. Всего было измерено 10 градуировочных проб массой 30 кг каждая. Содержание серы в пробах варьировалось от 0,68 до 2,38 %. Градуировочная зависимость, оказалось, имеет про-

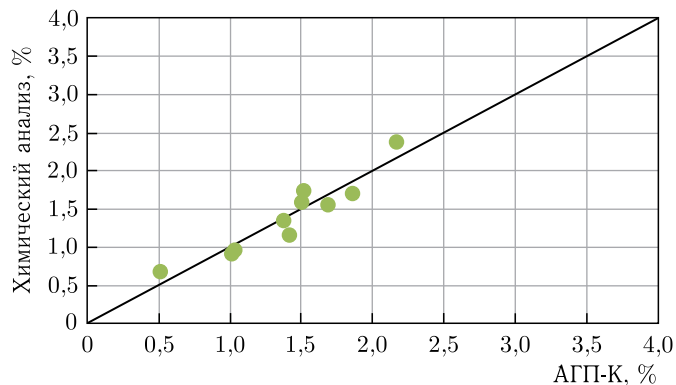


Рис. 5. Сравнение результатов химического анализа и измерений АГП-К. Сплошной линией показана диагональ равных значений



Рис. 6. Интерфейс оператора. Центральная панель показывает массовую концентрацию серы, боковая панель — статус команды, отправленной на узел сепарации

стой вид:  $X_{\text{согг}} = AX + B$ , где  $A = 0,66$  и  $B = 0,41\%$ , а  $X$  и  $X_{\text{согг}}$  — показания АГП-К до и после градуировки соответственно. Коэффициент корреляции  $R$  между значениями химического анализа и показателями АГП-К оказался достаточно высоким  $R = 0,94$ .

На рис.6 показано окно интерфейса пользователя, отвечающее за показ массовой концентрации серы и управление блоком сепарации.

Расстояние между точками на рис. 6 составляет 40–60 с. Конвейер загружался рудой из дробилки, которую питали 30-т самосвалы. Руда с одного самосвала проходила через анализатор за 5–8 мин. Во время данных испытаний сначала на дробление были поданы три машины высокосернистой руды, в четвертой машине была смесь высокосернистой и регулярной руд, а затем шла только регулярная руда. После прохождения анализатора руда по фиксированному конвейеру заполняла самосвалы, которые отвозили ее на рудный склад в отдельные штабеля. Затем пробы из каждого штабеля были взяты для измерений РФА-методом.

Результаты измерений и их сравнение с данными РФА приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты измерений массовой концентрации серы для высокосернистой (ВР) и регулярной (РР) руд

Номер машины	Руда	S, %	
		АГП-К	РФА
1	ВР	2,2	1,72
2	ВР	2,9	2,40
3	ВР	4,9	2,14
4	ВР/РР	2,7	0,77
5	РР	1,9	0,91
6	РР	1,4	0,58
7	РР	0,8	1,04

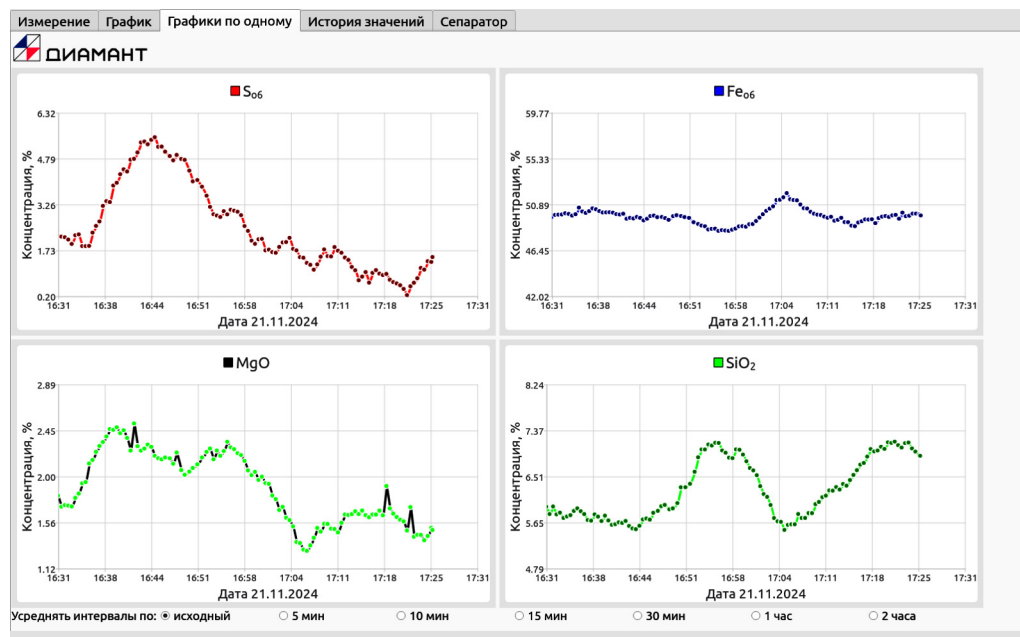


Рис. 7. Интерфейс оператора. Временная зависимость массовых концентраций Fe, S, MgO, SiO<sub>2</sub>. Интервал между точками 40–60 с

Видно, что имеется качественное согласие данных РФА и АГП-К. В обоих случаях зафиксировано повышенное содержание серы в первых трех машинах, падение ее концентрации в машине № 4 и низкое содержание в последних трех. Коэффициент детерминации между данными АГП-К и РФА составил  $R^2 = 0,66$ .

Помимо массовой концентрации серы анализатор определял в режиме реального времени и массовые концентрации других оксидов (рис. 7).

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Проведенные измерения показывают, насколько эффективен метод меченых нейтронов для решения задачи сепарации руды. Основное отличие ММН от хорошо известных методов нейтронно-активационного анализа (НАА) состоит не только в том, что применение ММН позволяет увеличить отношение сигнал–фон в 200 и более раз. Использование именно быстрых нейтронов с энергией 14,1 МэВ дает возможность хорошо определять концентрации легких элементов, таких как С, N, O, P, что является затруднительным как для метода НАА, так и для рентгено-флуоресцентного анализа (РФА), поскольку методом РФА сложно определять элементы с атомным номером  $Z < 11$ .

Кроме того, по сравнению с другими методами экспресс-анализа элементного состава материалов, такими как РФА, можно отметить следующие преимущества ММН:

— большой объем анализируемого вещества, поскольку приборы РФА имеют исследуемую зону вещества в несколько миллиметров, а исследуемая зона в случае ММН может представлять собой участок  $40 \times 40$  см на поверхности руды и 30 см в глубину;

— использование ММН не требует никакого отбора проб;

— использование ММН не требует дорогостоящих эталонных образцов;

— разработанная методика сепарации может быть применима не только к железной руде, но и к любому минеральному сырью, транспортируемому по конвейеру, например, к углю, медно-никелевым или фосфатным рудам.

Важным обстоятельством является то, что сепаратор ММН не настраивается под селекцию только лишь одного элемента, а напротив, для сепаратора ММН можно задать условия отбора практически для всех основных элементов, входящих в состав сепарируемого вещества.

Градуировочные характеристики сепаратора сводятся к простым линейным зависимостям, которые хорошо аппроксимируют результаты в широком диапазоне содержания элементов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан и проверен в эксплуатации конвейерный сепаратор железной руды на основе метода меченых нейтронов. Сепаратор позволяет проводить разделение руды по значениям массовой концентрации серы, железа общего и оксида кремния. Сепаратор успешно испытан при низких температурах окружающей среды до  $-30^\circ\text{C}$ .

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность сотрудникам ОИЯИ и специалистам ООО «Диамант» С. Г. Щербакову, П. П. Реунову, О. Г. Тарасову, И. Е. Воробьеву, принимавшим участие в создании и испытании сепаратора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Valkovic V.* 14 MeV Neutrons: Physics and Applications. Boca Raton: CRC Press, 2015. 516 p.
2. *Alexakhin V. Y. et al.* Detection of Diamonds in Kimberlite by the Tagged Neutron Method // Nucl. Instr. Meth. A. 2015. V. 785. P. 9.
3. *Копач Ю. Н., Сапожников М. Г.* Применение метода меченых нейтронов для фундаментальных и прикладных исследований // ЭЧАЯ. 2024. Т. 55, вып. 1. С. 103–177.
4. *Bystritsky V. M. et al.* DVin — Stationary Setup for Identification of Explosives // Phys. Part. Nucl. Lett. 2008. V. 5. P. 441.
5. *Алексахин В. Ю. и др.* Оценка возможности определения элементного состава горных пород с помощью метода меченых нейтронов. Препринт ОИЯИ P14-2015-52. Дубна, 2015.
6. *Alexakhin V. Y. et al.* Determination of the Elemental Composition of Geological Rocks and Minerals by the Method of Tagged Neutrons // 23rd Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics (ISINN-23), Dubna, Russia, May 25–29, 2015.