

# Метод меченых нейтронов — новый способ элементного анализа минерального сырья

**РЕФЕРАТ.** Обсуждается новый способ определения элементного состава вещества — метод меченых нейтронов (ММН). По сравнению с обычными нейтронными технологиями на основе тепловых нейтронов ММН обладает большей проникающей способностью, возможностью определять элементную концентрацию углерода и кислорода, более высокой точностью, а также позволяет определять все три координаты измеряемой области объекта. Приведены характеристики анализаторов ММН — стационарного и потокового, устанавливаемого на конвейере для онлайн-контроля элементного состава сырьевой смеси.

**Ключевые слова:** метод меченых нейтронов, нейтронный генератор, элементный анализ, потоковый анализатор, производство цемента, цементное сырье.

**Keywords:** Tagged Neutron Method, neutron generator, elemental analysis, on-stream analyser, cement production, raw materials for cement.

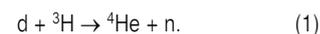
## 1. Введение

Элементный анализ минерального сырья и горных пород с помощью нейтронов имеет долгую историю, восходящую к первым работам Бруно Понтекорво в 1940 году по нейтронному каротажу нефти. Сейчас во всем мире работают несколько тысяч потоковых анализаторов на быстрых и тепловых нейтронах для анализа в режиме онлайн угля,

фосфорных руд, цемента, аглодоменной шихты и других материалов. Во всех этих областях применения можно использовать новую технологию элементного анализа вещества с помощью меченых нейтронов, которую разработали ученые Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна).

Суть метода меченых нейтронов (ММН) состоит в облучении исследуемых объектов

быстрыми нейтронами с энергией 14 МэВ, которые возникают в ядерной реакции столкновения дейтронов с тритиевой мишенью:



Эта реакция примечательна тем, что в ней образуются только две частицы, которые разлетаются практически в противоположных направлениях (рис. 1). Поэтому если зарегистрировать  $\alpha$ -частицу (ядро  ${}^4\text{He}$ ), то можно точно узнать направление, в котором полетел нейтрон, генерированный совместно с этой  $\alpha$ -частицей. Эта процедура называется мечением нейтрона.

Меченый нейтрон, попадая в вещество, индуцирует реакции неупругого рассеяния следующего типа:



при протекании которых после перехода ядра  $A$  в возбужденное состояние  $A^*$  возбуждение снимается путем испускания  $\gamma$ -квантов. Энергетический спектр  $\gamma$ -квантов каждого элемента уникален и служит своеобразными «отпечатками пальцев», позволяющими идентифицировать тот или иной элемент.

Для генерации нейтронов используется портативный нейтронный генератор. Это миниатюрный ускоритель размером около



Рис. 1. Общая схема метода меченых нейтронов



Рис. 2. Общий вид нейтронного модуля (слева) и шкафа электроники (справа)



Рис. 3. Схема размещения стационарного анализатора в контейнере



Рис. 4. Общий вид потокового анализатора АГП-К

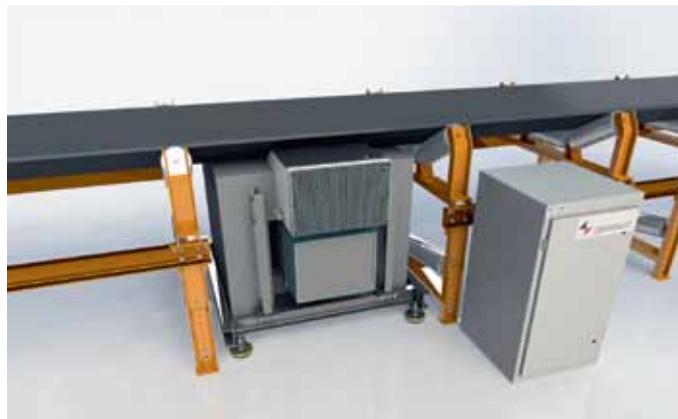


Рис. 5. Встраивание потокового анализатора в конвейер

30 см, ускоряющий дейтроны до энергии порядка 100 кэВ. В генератор встраивается  $\alpha$ -детектор, который обычно изготавливают в виде матрицы, состоящей из нескольких независимых детекторов (пикселей). Каждый пиксель отвечает за создание отдельного пучка меченых нейтронов. Обычно объект «освещается» 9 пучками, но существуют нейтронные генераторы, которые облучают объект 256 пучками. Пучки меченых нейтронов разделяют всю область досмотра на отдельные части (воксели), в каждом из которых анализируется элементный состав.

## 2. Преимущества метода меченых нейтронов

Детекторы, работа которых основана на ММН, давно используются в различных областях применения. Первыми были изготовлены детекторы ММН для обнаружения взрывчатых веществ [1, 2], затем метод использовали для обнаружения алмазов внутри кимберлитовой руды [3, 4]. Поэтому его преимущества хорошо известны специалистам.

**2.1. Большая проникающая способность.** Данная особенность ММН обусловлена двумя факторами: большой проникающей способностью быстрых нейтронов с энергией

14 МэВ и тем, что эти нейтроны возбуждают именно ядра элементов. Возбуждение ядерных уровней в реакциях неупругого рассеяния нейтронов снимается излучением высокоэнергичных  $\gamma$ -квантов с энергиями в диапазоне 1—7 МэВ. Такое  $\gamma$ -излучение также имеет высокую проникающую способность.

В результате детекторы ММН используют для обнаружения взрывчатых веществ в крупногабаритных грузах — морских контейнерах, транспортных фурах. Подчеркнем, что в отличие от рентгеновских методов анализа, которые предоставляют данные лишь о составе поверхностного слоя толщиной несколько мил-

# МОДУЛЬ

# ООО

# «Диамант»

Абсолютная среднеквадратическая погрешность измерений потокового анализатора АГП-К

Параметр	C	CaO	Fe <sub>общ</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O
Диапазон содержаний, % масс.	1—100	9—43	6—60	3—14	6—43	1—40	2—20	1—9
$\sigma^{\text{abs}}$ , %	0,12	0,77	0,31	0,5	0,38	0,49	0,24	0,27

лиметров, ММН дает сведения об элементном составе всего слоя толщиной до 300 мм в объеме вещества, находящегося в зоне облучения.

С практической точки зрения эта особенность ММН позволяет проводить элементный анализ пробы, взятой в полевых условиях, без какой-либо пробоподготовки — сушки, дробления, перекалывания в отдельные емкости. В приемный лоток установки ММН проба помещается в том же мешке, в котором ее доставили, например, из карьера.

Большая проникающая способность ММН также дает возможность размещать нейтронный генератор под лентой конвейера. Такое расположение удобно с практической точки зрения, поскольку не требует изменений в конструкции действующего конвейера.

**2.2. 3D-элементный анализ.** Наличие  $\alpha$ -детектора позволяет измерить длительность временного интервала между сигналами с  $\alpha$ - и  $\gamma$ -детекторов и, зная скорость нейтрона, определить расстояние от источника нейтронов до точки, из которой был выпущен  $\gamma$ -квант. Поэтому ММН позволяет определить не просто элементный состав образца, усредненный по зоне облучения, но и локальную концентрацию элемента в разных зонах и на поверхности, и в глубине исследуемого образца.

Эта особенность ММН была использована для обнаружения алмазов внутри кимберлитовой породы без ее дробления. Все

существующие технологии добычи алмазов сводятся к многократному размалыванию кимберлитовой породы и поиску алмазов, открывающихся в результате дробления очередной порции. Поэтому при таком подходе повреждаются наиболее ценные и редко встречающиеся крупные алмазы.

Применение ММН позволяет определить элементную концентрацию углерода внутри кимберлитовой породы без ее дробления. На присутствие алмаза указывает повышенное локальной концентрации углерода в зоне досмотра. По ней можно обнаружить алмазы внутри кимберлитовой руды, крупность кусков которой в 10 раз превышает линейный размер алмаза [3, 4].

**2.3. Подавление фона.** Для определения концентрации элемента в ММН отбираются не все  $\gamma$ -кванты, попавшие в  $\gamma$ -детектор, а лишь те, что были испущены из определенной области объекта досмотра, облучаемой данным меченым пучком. Когда  $\alpha$ -частица попадает в пиксель  $\alpha$ -детектора, открывается окно совпадений и для анализа отбираются только те  $\gamma$ -кванты, которые успевают долететь до  $\gamma$ -детектора за определенное время, зависящее от взаимного положения объекта и  $\gamma$ -детектора. Обычный источник нейтронов испускает их во все стороны. Соответственно,  $\gamma$ -кванты летят от всего вещества, расположенного вокруг источника. ММН позволяет отобрать  $\gamma$ -кванты только из интересующей

нас области объекта. Это приводит к существенному улучшению соотношения сигнал/шум. По сравнению с потоковыми анализаторами, в которых источниками нейтронов являются радиоактивные элементы или импульсные нейтронные генераторы, соотношение сигнал/шум в установках ММН улучшается почти в 200 раз. Благодаря этому, в свою очередь, повышается точность измерений.

Если обычный нейтронный источник можно сравнить с обычной лампой, испускающей свет во все стороны, то установка ММН — это нейтронный прожектор или нейтронная лазерная указка, освещающая только объект анализа.

**2.4. Возможность определения концентраций легких элементов.** В настоящее время изучена применимость ММН для определения массовых концентраций 25 элементов: Na, Mg, C, N, O, F, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Zr, Pb, Sn, Bi, Sb.

Особенно хорошо ММН позволяет находить концентрацию углерода, поскольку его спектр определяет всего лишь одна линия с энергией 4,44 МэВ. Это дает уникальную возможность при анализе угля напрямую устанавливать не только зольность, но и содержание углерода, входящего в состав летучих и нелетучих веществ.

Важнейшей особенностью ММН является также возможность прямого определения концентрации кислорода. Это позволяет избежать зависимости результатов от влажности пробы. Изначально в ММН определяются концентрации отдельных элементов, затем они пересчитываются в концентрации оксидов, причем без учета доли кислорода. Прямые эксперименты показали отсутствие зависимости результатов анализа от влажности

пробы вплоть до ее значения 20%. Показано также, что ММН правильно воспроизводит концентрации элементов в пульпе.

Отметим, что потоковые анализаторы на тепловых нейтронах, использующие радиоактивные источники, не могут обнаруживать углерод и кислород.

### 3. Установки ММН для анализа горных пород и минерального сырья

В настоящее время разработаны две модификации установки ММН для проведения элементного анализа горных пород и минерального сырья: стационарный анализатор АГП-Ф и потоковый анализатор руды на конвейере АГП-К. Стационарный анализатор состоит из нейтронного модуля, шкафа электроники считывания и рабочего места оператора. В нейтронном модуле размещены портативный нейтронный генератор ИНГ-27 производства ФГУП «ВНИИА им Н. Л. Духова» со встроенным 9-пиксельным  $\alpha$ -детектором, система из 12  $\gamma$ -детекторов на основе кристалла германата висмута  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (BGO) и биологическая защита. Габаритные размеры нейтронного модуля — 1800×1200×1500 мм.

Портативный нейтронный генератор ИНГ-27 создает поток нейтронов с энергией 14,1 МэВ. Интенсивность нейтронного пучка  $I = 5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ .

Общий вид нейтронного модуля установки показан на рис. 2.

Для работ в полевых условиях установка размещается в 20-футовом контейнере. Ее общий вид показан на рис. 3.

Опытно-промышленная эксплуатация установки проходила на Восточном руднике АО «Апатит». В настоящее время стацио-

нарный анализатор используется для анализа шламовых проб апатитовой, магнетитовой и апатит-штаффелитовой руды в АО «Ковдорский ГОК».

Потоковый анализатор минерального сырья на конвейере АГП-К разработан по заказу АО «Северо-Западная фосфорная компания». Общий вид установки показан на рис. 4. Она состоит из четырех основных частей: блока нейтронных генераторов, системы детектирования  $\gamma$ -квантов, системы электроники и биозащиты.

Для обеспечения бесперебойной работы установки в режиме 24/7 предусмотрена установка двух нейтронных генераторов. Они размещаются под лентой конвейера в подвижном боксе. Для измерения энергетических спектров  $\gamma$ -квантов используются два блока по семь сцинтилляционных детекторов на основе кристаллов BGO. Для стабилизации световых выходов кристаллов BGO все  $\gamma$ -детекторы помещены в термостаты.

Для уменьшения радиационного фона от нейтронного генератора применяется биозащита. Важным отличием потокового анализатора с нейтронным генератором от установок, где источником нейтронов является радиоактивный источник типа  $^{252}\text{Cf}$ , является возможность исключить излучение при проведении каких-либо эксплуатационных работ в районе размещения анализатора. Это полностью решает вопросы радиационной безопасности.

Установка размещается между роликовыми опорами конвейера (рис. 5). Ее габариты для конвейера АО «СЗФК» с шириной ленты 1200 мм — 1400×2200×1200 мм.

Скорость движения материала по конвейеру не имеет значения, поскольку типичное время

протекания реакций (1) и (2) составляет  $10^{-23}$  с. Установка выдает данные о массовой концентрации оксидов каждые 30 с.

Погрешности измерений были определены в ходе измерений на пробах массой 30—60 кг на специальном стенде, имитирующем работу реального конвейера. Результаты приведены в таблице.

Важная особенность анализатора АГП-К — постоянство интенсивности нейтронного генератора. Она полностью контролируется и не меняется в течение срока службы нейтронной трубки. Таким образом, уровень аналитических характеристик остается неизменным. Эта стабильность устраняет необходимость в кропотливых и дорогостоящих рутинных калибровках анализатора, которые требуются для систем на основе радиоактивных изотопов. Калибровка АГП-К осуществляется в заводских условиях, и мы готовы провести бесплатные предварительные испытания на пробах материалов всех заинтересованных производителей цемента.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bystritsky V.M., Gerasimova V.V., Kadyshvskaya V.G., Kobzev A.P., et al. DVIN — stationary setup for identification of explosives // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. 2008. Vol. 5, N 5. P. 441—446.
2. Bystritsky V.M., Zamyatin N.I., Zubarev E.V., Rapatsky V.L., et al. Stationary setup for identifying explosives using the tagged neutron method // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. 2013. Vol. 10, N 5. P. 722—729.
3. Alexakhin V. Yu., Bystritsky V.M., Zamyatin N.I., Zubarev E.V., et al. Detection of diamonds in kimberlite by the tagged neutron method // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Res. A*. 2015. Vol. 785. P. 9—13.
4. Никитин Г.М., Рогов Ю.Н., Сапожников М.Г., Ямов А.В. Использование метода меченых нейтронов для сухого обогащения кимберлитовой руды // *Горный журнал*. 2018. № 5. С. 58—62.