

УДК 539.106

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОТОКАХ ПО МГНОВЕННОМУ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЮ ПРИ ЗАХВАТЕ НЕЙТРОНОВ

Б. И. КУРБАНОВ¹⁾, А. Р. ЖУРАКУЛОВ¹⁾, А. М. МУЗАФАРОВ¹⁾

¹⁾Институт ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан,
ул. Я. Гуломова, 70, 100047, г. Ташкент, Узбекистан

Приводятся результаты исследования возможности контроля элементного состава в технологических потоках по мгновенному гамма-излучению при захвате нейтрона. Создана экспериментальная установка на основе радионуклидного ²⁵²Cf-источника нейтронов. Спектрометрическая система состоит из полупроводникового Ge-детектора и многоканального анализатора импульсов. Разработан способ определения концентрации компонентов сложных смесей.

Ключевые слова: захват нейтронов; мгновенное гамма-излучение; элементный состав; радионуклидный источник; технологический поток; концентрация; экспрессность анализа.

RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF MONITORING THE ELEMENT COMPOSITION IN TECHNOLOGICAL FLOWS BY PROMPT GAMMA-RADIATION AT NEUTRONS CAPTURE

B. I. KURBANOV^a, A. R. JURAKULOV^a, A. M. MUZAFAROV^a

^aInstitute of Nuclear Physics, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,
70 Y. Gulomov Street, Tashkent 100047, Uzbekistan,
Corresponding author: B. I. Kurbanov (bkurbanov@inp.uz)

This report presents the results of a study of the possibility of controlling the elemental composition in technological streams by instantaneous gamma radiation of neutron capture. An experimental setup based on a radionuclide (²⁵²Cf) neutron source has been assembled, the spectrometric system consists of a semiconductor Ge detector and a multi-channel pulse analyzer. A method has been developed for determining the concentration of components of complex mixtures.

Keywords: neutron capture; instant gamma radiation; elemental composition; radionuclide source; process stream; concentration; expressness of analysis.

Образец цитирования:

Курбанов БИ, Журакулов АР, Музафаров АМ. Исследование возможности контроля элементного состава в технологических потоках по мгновенному гамма-излучению при захвате нейтронов. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2020;2:36–40.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-36-40>

For citation:

Kurbanov BI, Jurakulov AR, Muzafarov AM. Research of the possibility of monitoring the element composition in technological flows by prompt gamma-radiation at neutrons capture. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2020;2:36–40. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-2-36-40>

Авторы:

Бахтияр Ибрагимович Курбанов – кандидат технических наук; заведующий лабораторией «Экология и биотехнологии».
Алишер Рустамович Журакулов – магистр, преподаватель кафедры «Общая физика».
Амрулло Мустафоевич Музафаров – доктор технических наук; доцент кафедры «Общая физика».

Authors:

Bakhtiyar I. Kurbanov, PhD (engineering); head at the laboratory of ecology and biotechnology.
bkurbanov@inp.uz
Alisher R. Jurakulov, master, senior lecturer at the department of general physics.
ali_80_84@mail.ru
Amrullo M. Muzafarov, doctor of sciences (engineering); associate professor at the department of general physics.
kurbanov_1960@bk.ru

Введение

В настоящее время для многих отраслей промышленности, например горно-металлургической, химической, нефтеперерабатывающей и других производств, требуется использовать методы и приборы, позволяющие определять содержание технологически важных элементов за короткое время (не более 15–20 мин) с момента отбора пробы из технологической цепочки, для того чтобы обеспечить возможность оперативного контроля и управления этих процессов. При этом концентрация элементов может быть в разном диапазоне: от долей % до 50 % и более. В традиционных методах определение содержания элементов, например в химическом анализе, результаты выдаются обычно через несколько часов, что не позволяет оперативно-воздействовать на ход технологических процессов.

Среди аналитических методов по своим принципиальным возможностям для этих задач наиболее подходящим можно считать ядерно-физический метод, основанный на использовании спектрометрии мгновенного гамма-излучения радиационного захвата нейтронов [1; 2]. Данный метод обладает рядом таких принципиальных преимуществ, как многоэлементность (ядра большинства химических элементов при захвате нейтронов испускают характерные гамма-спектры, по которым возможно идентифицировать элемент), экспрессность (процесс радиационного захвата происходит практически мгновенно, за время 10^{-13} сек), глубинность (проникающая способность как нейтронов, так и гамма-излучения достаточно высока), дистанционность и безконтактность (возможно анализировать без контакта с исследуемым объектом), неразрушаемость (для этого метода не обязательна пробоподготовка), экологическая чистота элементного анализа (остаточная активность исследованных образцов достаточно низкая) [3; 4]. Для использования этого метода возможны разработки транспортабельных установок на основе радионуклидного источника нейтронов. Наиболее оптимальным для этой цели является ампульный источник радионуклида – калифорния-252 (^{252}Cf) или современные портативные генераторы нейтронов.

Экспериментальная часть. Экспериментальные устройства для проведения аналитического исследования спектрометрии мгновенного гамма-излучения при захвате нейтронов должны отвечать ряду противоречивым требованиям. Чтобы получить максимальную плотность потока тепловых нейтронов на исследуемом образце, необходимо образец разместить вблизи источника нейтронов. Однако при этом трудно измерять низкоэнергетическую область гамма-спектра, так как в результате прохождения слоя замедлителя и фильтра в конструкции установки теряется интенсивность гамма-излучения. Если исследуемый образец расположить вблизи детектора (на выведенном пучке нейтронов), то уменьшится плотность потока тепловых нейтронов. Вид спектра гамма-излучения и значение фона сильно зависят от применяемого при создании установки конструкционного материала. Поэтому выбор геометрии измерения и конструкционных материалов при разработке устройства является сложной задачей. Также сложно моделировать и теоретически подсчитать условия для получения оптимальной плотности потока тепловых нейтронов и аналитических сигналов – гамма-излучения захвата нейтронов, а также толщину замедлителей нейтронов.

Проанализировав литературные данные, следует отметить, что еще недостаточно исследованы аналитические возможности метода, нет единого подхода к геометрии измерения и конструкции устройств, нет детально разработанных методик определения содержания элементов в конкретных объектах. Весьма скудным является исследование физических особенностей спектров, которые могли бы использоваться в аналитических целях.

Геометрия измерения и оптимальные параметры установки (плотности потока тепловых нейтронов, эффективные размеры и материалы системы замедлителей и отражателей нейтронов с энергетическим спектром от теплового (кТ) до 15 МэВ), размеры исследуемого образца и биологической защиты и другие параметры найдены авторами исключительно путем экспериментальных измерений.

Для проведения экспериментальных исследований собрана экспериментальная установка на основе радионуклидного ^{252}Cf -источника нейтронов с выходом 4×10^7 нейтр./сек.

Для медленных нейтронов ($E_n < 0,5$ эВ) сечение радиационного захвата нейтрона изменяется по закону $1/\sqrt{E_n}$. Тогда число захватов в единицу времени в 1 см^3 может быть записано как

$$\Omega = N n v_0 \sigma_0, \quad (1)$$

где N – число ядер в объеме 1 см^3 , nV_0 – поток нейтронов, σ_0 – сечение захвата нейтронов при тепловой энергии ($E_n = 0,025$ эВ).

На рис. 1 приводится принципиальная схема экспериментальной установки – поточного анализатора на основе радионуклидного ^{252}Cf -источника нейтронов. В отличие от известных установок, предназначенных для контроля элементного состава по спектрометрии мгновенного гамма-излучения, в данной конструкции на место исследуемого образца установлен массопровод, проходящий сквозь экспериментальную установку. Размеры и материал массопровода выбираются исходя из решаемых

задач, например, необходимо осуществлять контроль элементного состава технологических растворов, сыпучих материалов, зерна или угля и т. д. Детектор гамма-излучения выбирается также в зависимости от решаемых задач, например для несложных объектов с высоким содержанием искомым элементов (когда отсутствуют мешающие элементы) можно использовать сцинтилляционный NaI(Tl)-детектор, а в случаях когда исследуемый объект является сложным по составу и имеется возможность мешающих влияний каких-либо элементов матрицы, желателно использовать полупроводниковые детекторы из чистого Ge с высоким энергетическим разрешением.

Для обеспечения биологической защиты персонала в конструкции экспериментальной установки изготовлен комбинированный слой защиты от нейтронного и гамма-излучения из полиэтилена с бором, а также свинца, что обеспечивает радиационную безопасность при работе.

Разработанный поточный анализатор собран на основе работы [5] и может быть применен для решения многих задач, связанных с «on-line» анализом продукции химической, горно-металлургической промышленности, сельского хозяйства (оценка качества зерна по содержанию белка) и других отраслей науки и производства.

Способ определения концентрации смесей в сложных образцах без измерения массы или плотности и объема

Рассмотрим способы анализа концентрации компонентов методом спектрометрии (гамма-излучения объекта), или его плотность и объем. Анализаторы, основанные на этих способах, содержат дополнительные устройства для измерения толщины объекта (если это на транспортной ленте), считая плотность или его массу постоянной. К тому же эти методы не позволяют определять концентрации легких элементов (H, N, S, и др.) и состоящих из них компонентов.

Интенсивность аналитического сигнала при захвате тепловых нейтронов ядрами элементов в исследуемом образце выражается отношением

$$N_{\gamma} = f n_M \sigma_M I_{\gamma} V, \quad (2)$$

где f – плотность потока нейтронов, n_M – число ядер элемента M в единице объема, σ_M – сечение захвата нейтронов для ядер элемента M , V – объем пробы, I_{γ} – выход гамма квантов с энергией E , испускаемых ядрами элемента M при захвата нейтрона.

Исключение таких недостатков, как расширение диапазона анализируемых компонентов, снижение трудоемкости и повышения оперативности методом спектрометрии гамма-излучения нейтронного захвата, в настоящей работе выполнено следующим способом.

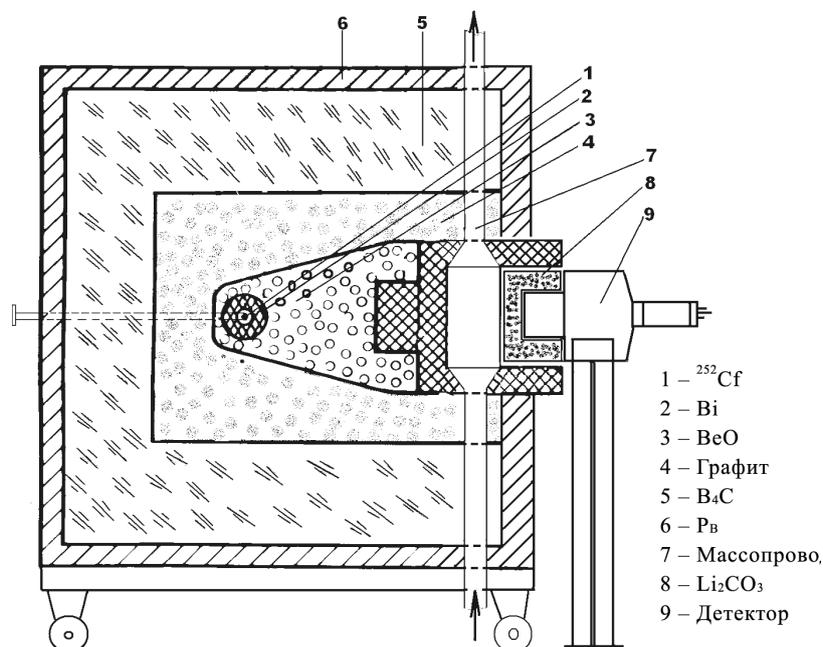


Рис. 1. Принципиальная схема поточного анализатора:

1 – ^{252}Cf -источник нейтронов, 2 – предварительный замедлитель быстрых нейтронов, 3 – замедлитель нейтронов, 4 – отражатель нейтронов, 5, 6 – биологическая защита персонала, 7 – массопровод, 8 – фильтр от нейтронов, 9 – детектор гамма-излучения

Fig. 1. Schematic diagram of a flow analyzer.

1 – ^{252}Cf -neutron source, 2 – preliminary fast neutron moderator, 3 – neutron moderator, 4 – neutron reflector, 5, 6 – biological personnel protection, 7 – mass pipeline, 8 – filter from neutrons, 9 – gamma radiation detector

$$C_k = \left(\frac{M_k}{\Gamma_k \sigma_k I_{\gamma k}} n_k \right) / \sum_{i=1}^n \frac{M_i \varepsilon_{ki}}{\Gamma_i \sigma_i I_{\gamma i}} n_i, \quad (3)$$

где n_i и n_k – число импульсов в единицу времени (скорость счета) гамма-излучения i -го и k -го компонентов; n – число компонентов; M_i и M_k – молекулярный вес i -го и k -го компонентов; Γ_i и Γ_k – число атомов i -го и k -го элементов (аналитических элементов) в молекуле i -го и k -го компонентов, σ_i , $I_{\gamma i}$ и σ_k , $I_{\gamma k}$ – сечение захвата нейтронов и выход гамма-квантов i -го и k -го компонентов, ε_{ki} – относительная эффективность регистрации излучений i -го и k -го компонентов.

Данный способ реализован при определении компонентов смесей, состоящих из сернокислого аммония – $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, азотнокислого аммония – NH_4NO_3 и воды – H_2O . Образцы смесей облучали замедленными нейтронами калифорнийского источника, гамма спектр образующихся радионуклидов измеряли с помощью сцинтилляционного гамма-спектрометра с кристаллом NaI (Тl) с размерами 100×150 мм.

Количество воды определяли по содержанию водорода, сернокислого аммония – по сере и азотнокислого аммония – по азоту.

На основании химических формул компонентов были составлены формулы для вычисления концентрации компонентов:

$$C_s = \frac{N_s}{0,602N_H + 0,121N_s + 0,41N_N}, \quad (4)$$

$$C_N = \frac{1,076N_s - 0,875N_s}{0,868N_H + 0,176N_s + 0,592N_N}, \quad (5)$$

где C_s и C_N – концентрации сернокислого аммония и азотнокислого аммония соответственно; N_H , N_s и N_N – число импульсов, соответствующих гамма-излучению водорода, серы и азота.

Полученные результаты по времени проведения анализа (время анализа 10 мин) и чувствительности удовлетворяют требованиям производства. Таким образом, с помощью данного способа можно контролировать концентрации компонентов смесей дистанционно, без непосредственного контакта с исследуемым объектом.

Были измерены технологические потоки: исходные руды, флотоконцентраты на разных этапах флотации и хвосты флотации, показаны возможности экспрессного определения содержания S, Cu, Ti, являющиеся технологически важными параметрами в процессах переработки золотосодержащих, медьсодержащих и титансодержащих руд, по кооторым можно судить о процессе и воздействовать на него.

На рис. 2 приводится график зависимости площади пика меди и титана от их концентрации в образцах за время измерения 20 мин, что дает возможность определения содержания этих элементов.

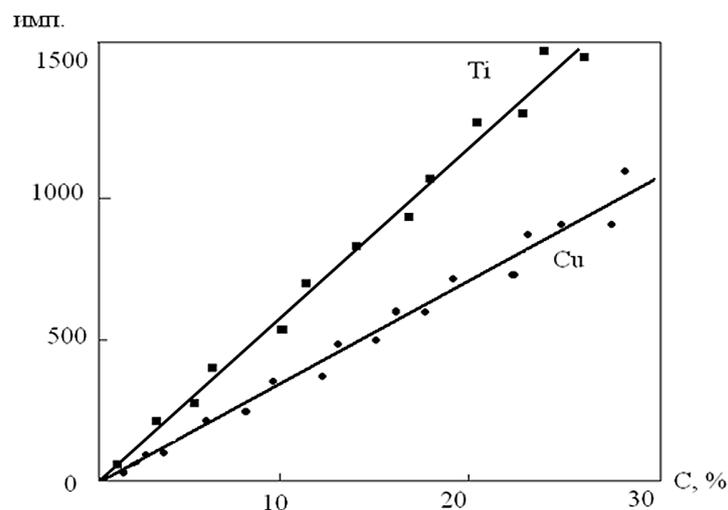


Рис. 2. Зависимость интенсивности аналитической гамма-линии Cu и Ti от содержания соответствующих элементов в исследуемых технологических продуктах

Fig. 2. A graph of the intensity of the analytical gamma line Cu and Ti on the content of the corresponding elements in the studied technological products

Выводы

В работе изложены результаты исследования по проведению контроля элементного состава в технологических потоках по мгновенному гамма-излучению. Представлены экспериментальная установка на основе радионуклидного ^{252}Cf -источника нейтронов и спектрометрическая система, состоящая из полупроводникового Ge-детектора и многоканального анализатора импульсов. Описан способ определения концентрации компонентов сложных смесей. Проведенные исследования показали, что по спектрометрии мгновенного гамма-излучения, возникающего при захвате теплового нейтрона, можно определять содержание элементов непосредственно на технологическом потоке сложного состава без отбора пробы.

Библиографические ссылки

1. Гума ВИ, Демидов АМ, Иванов ВА, Миллер ВВ. *Нейтронно-радиационный анализ*. Москва: Энергоатомиздат; 1984. 64 с.
2. Paul RL, Lindstrom RM. Prompt gamma-ray activation analysis: Fundamentals and applications. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. AKADEMIAI KIADO*. 2000;243(1):181–189.
3. Seppo Ustalo, Tuula Lukander. On-line neutron capture gamma analysis with a Ge(Li) detector. *Nuclear Instruments and Methods*. 1981;188(2):439–443.
4. Курбанов БИ, Кист АА, Курбанова НБ. Исследование возможности нейтронно-радиационной методики определения содержания азота в зерне и зерновых продуктах. *Узбекский физический журнал*. 2017;19(5):51–55.
5. Арипов ГА, Курбанов БИ. Патент РУз № IDR-04491 от 2001 г. «Устройство для определения элементного состава вещества».

References

1. Guma VI, Demidov AM, Ivanov VA, Miller VV. Neutron-radiation analysis. Moscow: Energoatomizdat; 1984. 64 p. Russian.
2. Paul RL, Lindstrom RM. Prompt gamma-ray activation analysis: Fundamentals and applications. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. AKADEMIAI KIADO*. 2000; 243(1):181–189.
3. Seppo Ustalo, Tuula Lukander. On-line neutron capture gamma analysis with a Ge (Li) detector. *Nuclear Instruments and Methods*. 1981;188(2):439–443.
4. Kurbanov BI, Kist AA, Kurbanova NB. Investigation of the possibility of a neutron-radiation technique for determining the nitrogen content in grain and grain products. *Uzbek physical journal*. 2017;19(5):51–55. Russian.
5. Aripov GA, Kurbanov BI. RUz patent No. IDR-04491 from 2001. A device for determining the elemental composition of a substance. Russian.

Статья поступила в редколлегию 26.04.2020.
Received by editorial board 26.04.2020.