

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ
ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОТОКАХ
ПО МГНОВЕННОМУ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЮ ЗАХВАТА НЕЙТРОНОВ**

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

**Б. И. Курбанов, А. Р. Журакулов, А. М. Музафаров
B. Kurbanov, A. R. Jurakulov, A. Muzafarov**

*Институт ядерной физики АН РУз, г. Ташкент, Республика Узбекистан
bkurbanov@inp.uz
Institute of Nuclear Physics, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,
Tashkent, Republic of Uzbekistan*

В данном докладе приводятся результаты исследования возможности контроля элементного состава в технологических потоках по мгновенному гамма-излучению нейтронного захвата. Собрана экспериментальная установка на основе радионуклидного ^{252}Cf - источника нейтронов, спектрометрическая система состоит из полупроводникового Ge-детектора и многоканального анализатора импульсов. Разработан способ определения концентрации компонентов сложных смесей.

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

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

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

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2020-1-357-360>

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 возможности оперативного контроля и управления этими процессами. При этом концентрация элементов может быть в разном диапазоне: от несколько мг/г до 50% и более. В традиционных методах определения содержания элементов, например, в химическом анализе, результаты выдаются обычно через несколько часов, что не дает возможности оперативного воздействия 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 принципиальных преимуществ, таких 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 захвата нейтронов 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 возможна разработка и 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.

Экспериментальные устройства для проведения аналитического исследования спектрометрии мгновенного гамма-излучения захвата нейтронов должны отвечать ряду противоречивых требований. 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 захвата нейтронов. Если исследуемый образец расположить вблизи детектора, т.е. на выведенном

пучке нейтронов, 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.

На основе анализа литературных данных 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, а также размеры исследуемого образца и биологической защиты, и другие параметры найдены авторами исключительно путём 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 (менее 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 1 см^3 объеме, 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. На позицию облучения исследуемого образца в данном варианте установки размещен массопровод, форма, размеры и материалы которого 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 искомых 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, желательно использовать полупроводниковые детекторы из чистого Ge с высоким энергетическим разрешением.

Для обеспечения защиты персонала в конструкции экспериментальной установки изготовлен комбинированный слой защиты от нейтронного и гамма-излучения из полиэтилена с бором и свинца, который 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 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. Существующие способы анализа концентрации компонентов методом спектрометрии гамма-излучения нейтронного захвата требуют, наряду с интенсивностью характерного гамма-излучения, измерять массу пробы (исследуемого объекта) или его плотность и объем. Поэтому 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 в следующем виде;

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

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 захвате нейтрона.

Для исключения данных недостатков: расширения диапазона анализируемых компонентов, снижения трудоемкости и повышения оперативности методом спектрометрии гамма-излучения нейтронного захвата использован следующий способ.

Материал облучали медленными нейтронами, измеряли одновременно интенсивность характерного (аналитического) гамма-излучения каждого из компонентов смеси, в качестве эталона выбирали образец с известными концентрациями всех компонентов, измеряли относительные эффективности регистрации аналитического гамма-излучения компонентов и их концентрацию (C_k) вычисляли по формуле:

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

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, $\sigma_i I_{\gamma i}$ и $\sigma_k I_{\gamma k}$ – 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.

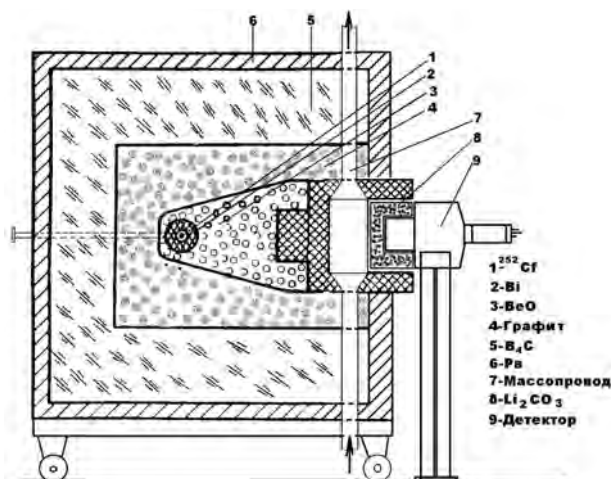


Рисунок 1 – Принципиальная схема поточного анализатора:

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.

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 калифорниевого источника, гамма-спектр образующихся радионуклидов измеряли с помощью сцинтилляционного гамма-спектрометра с кристаллом NaI (TI) с размерами $100 \times 150 \text{ мм}$.

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, и показаны возможности экспрессного определения содержания S, Cu, Ti, которые являются технологически важными параметрами в процессах переработки золотосодержащих, медьсодержащих и титансодержащих руд и по ним 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 показывает возможность определения содержания этих элементов.

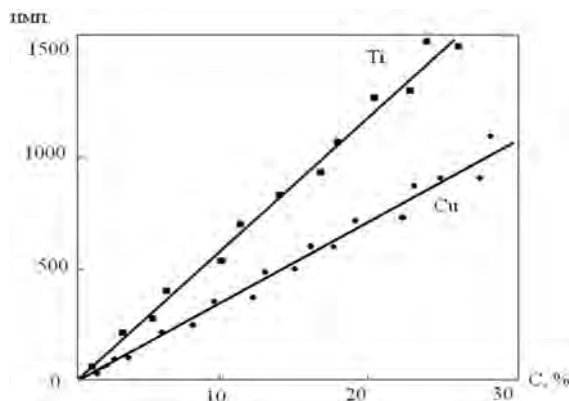


Рисунок 2 – График зависимости интенсивности аналитической гамма-линии Cu и Ti от содержания соответствующих элементов в исследуемых технологических продуктах

Таким образом, проведенные исследования показали, что по спектрометрии мгновенного гамма-излучения захвата нейтронов на технологическом потоке сложного состава без отбора пробы можно определять содержание элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гума, В.И., Демидов, А.М., Иванов, В.А., Миллер, В.В. Нейтронно-радиационный анализ. - М.: Энергоатомиздат, 1984. – 64 с.
2. Paul R.L., Lindstrom R.M. Prompt gamma-ray activation analysis: Fundamentals and applications // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. AKADEMIKI KIADO, – 2000. – V.243, No 1. – P. 181-189.
3. Seppo Ustalo, Tuula Lukander. On-line neutron capture gamma analysis with a Ge(Li) detector. // Nucl. Instrum. and Methods.- ELSEVIER Science Publishing Company, Inc., 1981.– V. 188, No 2.– P. 439-443.
4. Курбанов Б.И., Кист А.А., Курбанова Н.Б. Исследование возможности нейтронно-радиационной методики определения содержания азота в зерне и зерновых продуктах. // Узбекский физический журнал. - Ташкент, «Фан», 2017. – т.19, № 5. – С. 51-55.
5. Патент РУз № IDR-04491 от 2001г. «Устройство для определения элементного состава вещества», авторы Арипов Г.А., Курбанов Б.И.

ИСКУССТВЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ В ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ НА ТЕРРИТОРИЯХ, ПРИЛЕГАЮЩИХ К СЕМИПАЛАТИНСКОМУ ИСПЫТАТЕЛЬНОМУ ПОЛИГОНУ

ARTIFICIAL RADIONUCLIDES IN SOIL-PLANT COVER OF FOREST ECOSYSTEMS IN THE TERRITORIES ADJACENT TO SEMIPALATINSK TEST SITE

**Н. В. Ларионова, А. В. Паницкий, А. Е. Кундузбаева,
А. М. Кабдыракова, Ю. С. Шевченко, А. Р. Иванова, А. О. Айдарханов
N. Larionova, A. Panitskiy, A. Kunduzbaeva,
A. Kabdyrakova, Yu. Shevchenko, A. Ivanova, A. Aidarkhanov**

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК,
г. Курчатов, Республика Казахстан
Larionova @nnc.kz

Branch 'Institute of Radiation Safety and Ecology' NNC RK, Kurchatov, Republic of Kazakhstan

В статье приведены значения удельной активности искусственных радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$ в почвах в сосновом бору на территории, прилегающей к Семипалатинскому испытательному полигону (далее–СИП). Рассмотрен характер распределения данных радионуклидов по почвенному профилю. Установлено, что максимальное содержание ^{241}Am , ^{137}Cs и $^{239+240}\text{Pu}$ находится в верхнем 5-сантиметровом слое, содержание ^{90}Sr распределяется равномерно до глубины 20 см. Концентрация радионуклидов ^{241}Am и ^{137}Cs в древесных и травянистых растениях ниже предела обнаружения используемой аппаратуры. Количественные значения удельной активности ^{137}Cs зарегистрированы только в коре. В коре также установлены максимальные значения для $^{239+240}\text{Pu}$. Концентрация ^{90}Sr в травянистых растениях (*Carex pilosa*) значительно выше, чем в древесных растениях (*Pinus silvestris*).

The paper provides specific activity values for ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$ artificial radionuclides in soil of the pine forest at the territory, adjacent to Semipalatinsk Test Site. Pattern of these radionuclides distribution along the soil profile was considered. The maximum concentration of ^{241}Am , ^{137}Cs and $^{239+240}\text{Pu}$ was registered in the top 5-cm thick layer, and ^{90}Sr is uniformly distributed up to the depth of 20 cm. It is revealed that activity concentration for ^{241}Am and ^{137}Cs in woody and herbaceous plants is below detection limits of the instrumentation used. Quantitative values of ^{137}Cs activity concentration are registered only in bark. The bark also shows maximum values for $^{239+240}\text{Pu}$. ^{90}Sr concentration in herbaceous plants (*Carex pilosa*) is significantly higher than in that in woody plants (*Pinus silvestris*).

Ключевые слова: Семипалатинский испытательный полигон (СИП), радионуклиды, ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$, почвы, растения.

Keywords: Semipalatinsk Test Site (STS), radionuclides, ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$, soils, plants.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2020-1-360-363>