

УДК 621.039.84

РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПРАВОК НА РЕЗОНАНСНОЕ САМОЭКРАНИРОВАНИЕ АКТИВАЦИОННЫХ ИНДИКАТОРОВ ИЗ ЗОЛОТА И ТАНТАЛА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ

Алейников Юрий Владимирович¹,
aleinikov@nnc.kz

Попов Юрий Анатольевич¹,
Popov@nnc.kz

Прозорова Ирина Валентиновна¹,
Prozorova@nnc.kz

¹ Институт атомной энергии НЯЦ РК,
Казахстан, 711100, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 10.

Актуальность работы обусловлена необходимостью оценить факторы резонансного самоэкранирования в активационных индикаторах из золота и тантала, используемых при проведении нейтронно-активационного анализа однокомпараторным методом k_0 -стандартизации. При облучении активационных индикаторов в поле надтепловых нейтронов ядерного реактора происходит возмущение потока из-за поглощения нейтронов внутри материала индикатора. Этот эффект может быть очень важным, особенно если у материала индикатора имеются резонансы в этой области энергий. Для учета эффекта возмущения нейтронного потока при активации должен быть рассмотрен фактор резонансного самоэкранирования G_{res} . Этот фактор зависит от геометрии и размера образца, а также от физических и ядерных свойств изотопа. Предложена кривая, которая хорошо согласуется с экспериментальными и вычисленными литературными значениями.

Цель работы: определение поправок на резонансное самоэкранирование активационных индикаторов при облучении в реакторе.

Методы исследования: моделирование и выполнение нейтронно-физических расчетов скорости реакции активации с помощью программы MCNP5 в зависимости от толщины индикаторов и ядерной концентрации изотопов; подбор аналитических зависимостей для расчета факторов резонансного самоэкранирования.

Результаты. Представлены результаты нейтронно-физических расчетов факторов резонансного самоэкранирования для активационных индикаторов из золота и тантала, используемых в качестве активационных индикаторов при нейтронном облучении. Получены зависимости поправочных коэффициентов от толщины индикатора, аналитические формулы для индикатора и зависимости скорости реакций от концентрации изотопов. Результаты расчетов будут использованы при проведении нейтронно-активационного анализа конструкционных материалов ядерной техники однокомпараторным методом k_0 -стандартизации с использованием исследовательского реактора ИВГ.1М.

Ключевые слова:

Фактор резонансного самоэкранирования, активационный индикатор, скорость реакции, код MCNP, нейтронно-физические расчеты.

Компараторный метод k_0 -стандартизации инструментального нейтронно-активационного анализа (k_0 -ИНАА) требует предварительного знания некоторых характеристик поля нейтронов для определения эффективного поперечного сечения (n, γ) реакций на изотопах элементов-аналитов. При определении потока или спектра надтепловых нейтронов активационным методом используются активационные индикаторы, спектральная чувствительность которых обусловлена наличием резонансной структуры энергетической зависимости поперечного сечения. При определении скорости (n, γ) реакции на ядрах элемента-мишени индикатора, когда эпитепловой энергетический интервал сечения реакции элемента содержит резонансы, результат измерения средней скорости реакции активации может быть искажен эффектом самоэкранирования. Физический смысл эффекта самоэкранирования заключается в том, что по мере проникновения нейтронов в глубину индикатора происходит изменение спектра

нейтронов, падающих на индикатор. При этом спектр нейтронов оказывается все более и более обедненным нейтронами с резонансными энергиями. В том случае, когда в рассматриваемый энергетический интервал попадают один или несколько особо сильных резонансов, внешние слои индикатора эффективно экранируют всю остальную массу индикатора от нейтронов соответствующих энергий даже при сравнительно небольших толщинах индикатора. Вследствие этого результат измерения скорости реакции начинает зависеть от толщины индикатора.

Целью данной работы являлось определение поправок на резонансное самоэкранирование активационных индикаторов (АИ) при нейтронном облучении. В результате проведенных расчетных исследований были определены зависимости скорости реакции (n, γ) для АИ из золота и тантала от толщины АИ, ядерной концентрации и энергии нейтронов. Получены значения факторов резонансного самоэкранирования в материалах АИ.

Объектом исследования являлись АИ из золота (^{197}Au) и тантала (^{181}Ta), используемые при нейтронно-активационном анализе. Основные параметры АИ приведены в табл. 1: A – молярная масса, P – плотность, θ – процентное содержание изотопа в смеси, E_{res} – энергия резонансного пика, $\sigma_{\text{tot}}(E_{\text{res}})$ – максимальное значение резонансного сечения (высота резонансного пика), $\Gamma\gamma$ – ширина каналов реакции (n, γ), Γ_n – ширина каналов реакции (n, n), I – значение эффективного резонансного интеграла [1].

В расчетах АИ имеют форму диска различной высоты диаметром 10 мм. АИ облучается изотропным источником промежуточных нейтронов реакторного спектра.

Таблица 1. Параметры изотопов, используемых в качестве АИ для k0-ИНАА

Table 1. Isotopes parameters used as AI for k0-ИНАА

Изотоп Isotope	A (г/моль $^{-1}$)	P (г/см $^{-3}$)	θ (%)	E_{res} (эВ)	$\sigma_{\text{tot}}(E_{\text{res}})$ (барн)*	$\Gamma\gamma$ (эВ)	Γ_n (эВ)	$\Gamma\gamma/I$ (%)
^{197}Au	196,97	19,32	100	4,91	30770	0,1225	0,0152	89,0
				4,28	13969	0,053	0,0039	93,1
^{181}Ta	180,95	16,65	100	10,34	4052	0,055	0,0047	92,3
				13,95	792	0,052	0,0010	98,1

*барн (barn)= 10^{-24} см 2

Нейтронно-физические расчеты были проведены с помощью программы MCNP5 [2, 3], относящейся к числу универсальных программ для решения задач переноса излучения в произвольной трехмерной геометрии с библиотеками констант ENDF/B-5, 6. При расчетах коэффициентов самоэкранирования для резонансных АИ вводились следующие допущения: АИ представляет собой тонкий диск; направление падения нейтронов на поверхность АИ изотропное. Расчетная модель представляет собой систему источник–АИ (рис. 1).

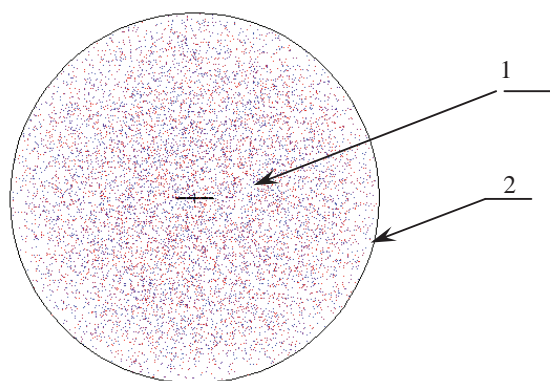


Рис. 1. Расчетная модель системы источник–АИ: 1) АИ; 2) нейтроны реакторного спектра

Fig. 1. Calculation model of AI (activation indicators) – source system: 1) AI; 2) reactor spectrum neutrons

Самопоглощение и рассеяние нейтронов в АИ представляют собой эффекты, определяющие фактор резонансного самоэкранирования $G_{\text{res}}(t)$.

На первом этапе расчетных исследований определялись зависимости $G_{\text{res}}(t)$ от толщины АИ с помощью программы MCNP5. Далее для аналитических зависимостей, приведенных в литературных источниках [4–18], были подобраны коэффициенты таким образом, чтобы полученные с помощью аналитического выражения и вычисленные с помощью программы MCNP5 зависимости $G_{\text{res}}(t)$ имели наибольшее совпадение.

Аналитическая зависимость фактора резонансного самоэкранирования $G_{\text{res}}(t)$ от толщины АИ имеет следующий вид:

$$G_{\text{res}}(t) = \frac{1}{1 + (t/a)^b}, \quad (1)$$

где t – толщина индикатора, мм; для ^{197}Au $a=0,0135$; $b=0,75$; для ^{181}Ta $a=0,023$; $b=0,78$.

На рис. 2 и 3 приведены результаты расчета зависимости фактора резонансного самоэкранирования $G_{\text{res}}(t)$ от толщины АИ из золота и тантала соответственно, а также данные из литературных источников.

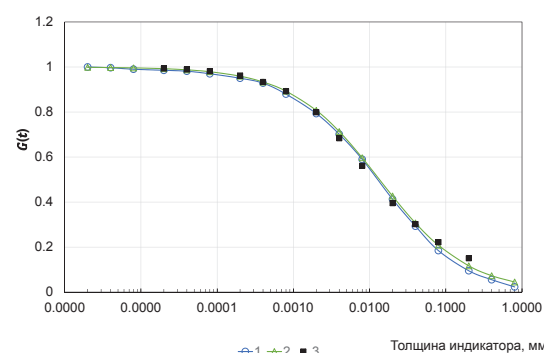


Рис. 2. Зависимость фактора резонансного самоэкранирования $G_{\text{res}}(t)$ от толщины Au-индикатора: 1) расчет по программе MCNP5; 2) расчет аналитическим методом; 3) литературные данные [19]

Fig. 2. Dependence of self-shielding factor $G_{\text{res}}(t)$ on Au-indicator thickness: 1) calculated by the MCNP5; 2) calculated by the analytical method; 3) published data [19]

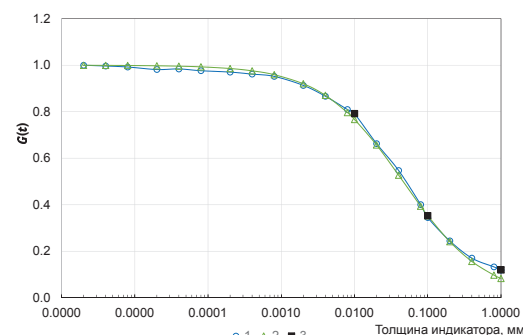


Рис. 3. Зависимость фактора резонансного самоэкранирования $G_{\text{res}}(t)$ от толщины Ta-индикатора: 1) расчет по программе MCNP5; 2) расчет аналитическим методом; 3) литературные данные [20]

Fig. 3. Dependence of self-shielding factor $G_{\text{res}}(t)$ on Ta-indicator thickness: 1) calculated by the MCNP5; 2) calculated by the analytical method; 3) published data [20]

Численные значения скорости реакции $R(n, \gamma)$ и расчетные значения фактора резонансного самоэкранирования для индикаторов из золота и тантала приведены в табл. 2 и 3 соответственно. Скорость реакций $R(n, \gamma)$ оценена на один нейтрон источника.

Таблица 2. Результаты расчетов для Au-индикатора

Table 2. Results of calculations for Au-indicator

Толщина, мм Thickness, mm	$R(n, \gamma)$, см ⁻³ ·с ⁻¹	$G_{res}(t)$ MCNP	$G_{res}(t)$, аналит. метод analytical method	$G_{res}(t)$ [4]
2,0·10 ⁻⁶	3,13·10 ⁻¹	1	1	–
4,0·10 ⁻⁶	3,10·10 ⁻¹	0,9967	0,9977	–
8,0·10 ⁻⁶	3,12·10 ⁻¹	0,9902	0,9962	–
2,0·10 ⁻⁵	3,11·10 ⁻¹	0,9855	0,9925	0,9936
4,0·10 ⁻⁵	3,10·10 ⁻¹	0,9814	0,9874	0,9893
8,0·10 ⁻⁵	3,07·10 ⁻¹	0,9701	0,9791	0,9815
0,0002	3,01·10 ⁻¹	0,9502	0,9592	0,9621
0,0004	2,92·10 ⁻¹	0,9283	0,9333	0,9335
0,0008	2,79·10 ⁻¹	0,8797	0,8927	0,8927
0,002	2,50·10 ⁻¹	0,7932	0,8072	0,7993
0,004	2,14·10 ⁻¹	0,7014	0,7134	0,6836
0,008	1,76·10 ⁻¹	0,5898	0,5968	0,5615
0,02	1,24·10 ⁻¹	0,4128	0,4268	0,3952
0,04	9,45·10 ⁻²	0,2936	0,3069	0,302
0,08	6,95·10 ⁻²	0,1844	0,2084	0,2219
0,2	4,71·10 ⁻²	0,0949	0,1169	0,1505
0,4	3,25·10 ⁻²	0,0552	0,0730	–
0,8	1,71·10 ⁻²	0,0231	0,0447	–

Таблица 3. Результаты расчетов для Ta-индикатора

Table 3. Results of calculations for Ta-indicator

Толщина, мм Thickness, mm	$R(n, \gamma)$, см ⁻³ ·с ⁻¹	$G_{res}(t)$ MCNP	$G_{res}(t)$, аналит. метод analytical method	$G_{res}(t)$ [5]
2,0·10 ⁻⁶	1,37·10 ⁻¹	1,0000	0,9996	–
4,0·10 ⁻⁶	1,36·10 ⁻¹	0,9967	0,9993	
8,0·10 ⁻⁶	1,36·10 ⁻¹	0,9923	0,9988	
2,0·10 ⁻⁵	1,35·10 ⁻¹	0,9815	0,9976	
4,0·10 ⁻⁵	1,34·10 ⁻¹	0,9840	0,9959	
8,0·10 ⁻⁵	1,34·10 ⁻¹	0,9764	0,9930	
0,0002	1,33·10 ⁻¹	0,9705	0,9858	
0,0004	1,32·10 ⁻¹	0,9617	0,9759	
0,0008	1,30·10 ⁻¹	0,9520	0,9593	
0,002	1,25·10 ⁻¹	0,9133	0,9202	
0,004	1,19·10 ⁻¹	0,8665	0,8705	
0,008	1,11·10 ⁻¹	0,8095	0,7965	
0,01	1,08·10 ⁻¹	0,7912	0,7668	0,792
0,02	9,08·10 ⁻²	0,6630	0,6569	–
0,04	7,49·10 ⁻²	0,5474	0,5272	
0,08	5,48·10 ⁻²	0,4005	0,3937	
0,1	4,72·10 ⁻²	0,3447	0,3530	0,353
0,2	3,35·10 ⁻²	0,2446	0,2412	–
0,4	2,33·10 ⁻²	0,1705	0,1562	
0,8	1,82·10 ⁻²	0,1327	0,0973	
1	1,62·10 ⁻²	0,1186	0,0830	0,120

На втором этапе расчетных исследований определялся фактор резонансного самоэкранирования как отношение скорости реакции в реальном об-

разце к скорости реакции в «бесконечно разбавленном» образце.

Фактор резонансного самоэкранирования $G_{res}(R)$ в диске радиуса R определяется выражением

$$G_{res}(R) = \frac{\int_{E_1}^{E_2} \Phi_0(E) \sigma_{n\gamma}(E) dE}{\int_{E_1}^{E_2} \Phi_0(E) \sigma_{n\gamma}(E) dE}, \quad (2)$$

где $\Phi_0(E)$ – невозмущенный поток эпитепловых нейтронов на единичный интервал энергии внутри бесконечно разбавленного образца; $\Phi(E)$ – представляет собой возмущенный поток внутри реального образца; $\sigma_{n\gamma}(E)$ – сечение реакции, где E_1 и E_2 – верхний и нижний предел энергии резонансов соответственно.

Для возмущенного потока нейтронов $\Phi(E)$ в расчете принято полное сечение реакции, которое учитывает рассеяние нейтронов в образце. При расчете скорости реакции для невозмущенного потока нейтронов задается фиктивная концентрация $\rho_0 \cdot 10^{-6}$ для моделирования «бесконечного разведения», при этом ρ_0 представляет собой значение концентрации для реального образца.

Для заданного радиуса R энергозависимый фактор резонансного самоэкранирования может быть определен как

$$G_r(E) = \frac{RR(E, \rho_0)}{RR(E, \rho_0 \cdot 10^{-6})}, \quad (3)$$

где $RR(E, \rho_0)$ и $RR(E, \rho_0 \cdot 10^{-6})$ – скорость реакции для концентраций ρ_0 и $\rho_0 \cdot 10^{-6}$ соответственно.

В общем случае фактор резонансного самоэкранирования зависит от плотности материала (ядерной концентрации), атомной массы, наличия примесей, толщины индикатора и существенно от резонансных сечений.

Для того чтобы определить концентрацию, соответствующую «бесконечному разбавлению», при проведении расчета скорости реакции для невозмущенного потока нейтронов, была изучена зависимость скорости реакции от ядерной концентрации N . График на рис. 4 показывает изменение скорости реакции на ядрах золота (этот материал имеет высокое резонансное сечение) и ядрах тантала в зависимости от концентрации. На графике видно, что скорость реакции увеличивается при уменьшении концентрации и ее насыщение для золота происходит при $\rho = \rho_0 / 10^{-5}$, для тантала при $\rho = \rho_0 / 10^{-4}$. По этой причине во всех последующих расчетах концентрации для бесконечного разбавления предполагались $\rho = \rho_0 \cdot 10^{-6}$.

Таким образом, чтобы оценить зависимость скорости реакции $R(n, \gamma)$ от концентрации изотопа, была задана концентрация для «бесконечного» разбавления, равная $\rho = \rho_0 \cdot 10^{-6}$ (ρ_0 – нормальная концентрации изотопа). На рис. 5 приведены результаты расчета скоростей реакций для двух значений концентрации золота: $\rho = \rho_0 \cdot 10^{-6}$ и ρ_0 . На графике (рис. 6) представлено изменение скорости реакции на атомах тантала в зависимости от концентрации.

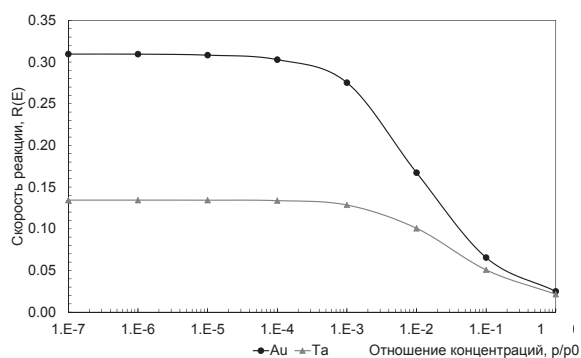


Рис. 4. Зависимость скорости реакции $R(E)$ от концентрации для Au- и Ta-индикаторов

Fig. 4. Dependence of the reaction rate $R(E)$ on concentration of Au and Ta indicators

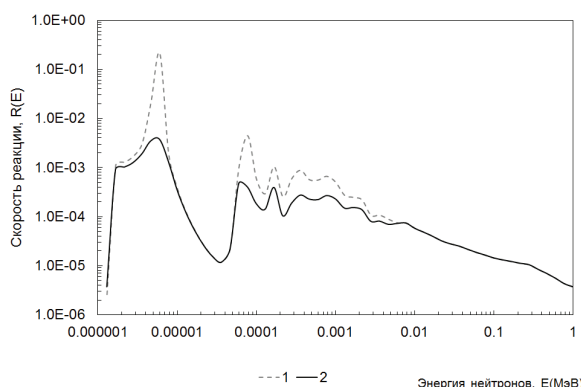


Рис. 5. Зависимость скорости реакции $R(n, \gamma)$ от энергии нейтронов для Au-индикатора: 1) концентрация $\rho = \rho_0 \cdot 10^{-6}$; 2) концентрация ρ

Fig. 5. Dependence of the reaction rate $R(n, \gamma)$ on neutron energy for Au-indicator: 1) concentration $\rho = \rho_0 \cdot 10^{-6}$; 2) concentration ρ

На графиках четко просматривается эффект самоэкранирования, показаны возмущенные и невозмущенные скорости реакций, для бесконечного

разбавленного образца видны хорошо выраженные пики в области резонансов.

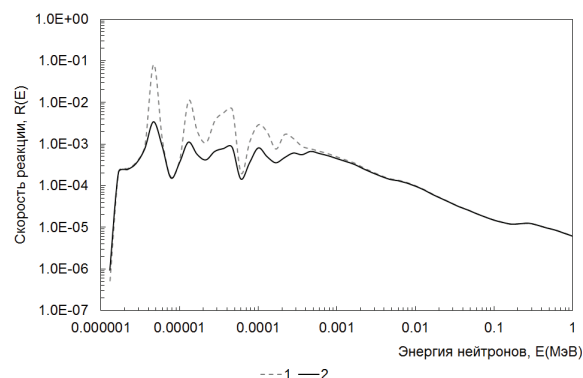


Рис. 6. Зависимость скорости реакции $R(n, \gamma)$ от энергии нейтронов для Ta-индикатора: 1) концентрация $\rho = \rho_0 \cdot 10^{-6}$; 2) концентрация ρ

Fig. 6. Dependence of the reaction rate $R(n, \gamma)$ on neutron energy for Ta-indicator: 1) concentration $\rho = \rho_0 \cdot 10^{-6}$; 2) concentration ρ

Закключение

Проведены расчётные исследования факторов резонансного самоэкранирования в активационных индикаторах из золота и тантала, используемых при нейтронно-активационном анализе. В ходе исследования:

- вычислены скорости реакции (n, γ) для активационных индикаторов из золота и тантала;
- определены зависимости поправочных коэффициентов самоэкранирования от толщины индикатора;
- для аналитического метода подобраны формулы для расчета поправочных коэффициентов;
- приведены изменения скорости реакции в зависимости от концентрации изотопов, показан эффект самоэкранирования.

Результаты будут использованы при проведении нейтронно-активационного анализа конструкционных материалов ядерной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jagodish K. Tuli. Nuclear Wallet cards (sixth ed.): National Nuclear Data Center for the U.S. Nuclear Data Program: Brookhaven National Laboratory // New York, Upton. – 2000. URL: <http://www.nndc.bnl.gov/wallet/wccurrent.html> (дата обращения: 10.02.2016).
2. X-5 Monte Carlo Team. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 5. Vol. I: Overview and Theory. Los Alamos National Laboratory Report: LA-UR-03-1987. – 2003 (Revised 10/3/05). URL: <http://www.nucleonica.net/wiki/images/8/89/MCNPvolI.pdf> (дата обращения: 10.02.2016).
3. MacFarlane R.E. New Thermal Neutron Scattering Files for ENDF/B-VI Release 2 (Новые файлы рассеяния тепловых нейтронов для второго выпуска ENDF/B-VI): Report LA-12639-MS (ENDF-356) UC-413: Los Alamos National Laboratory. – 1994. URL: <http://t2.lanl.gov/nis/publications/methods.pdf> (дата обращения: 10.02.2016).
4. Goncalves I.F., Martinho E., Salgado J. Extension to cylindrical samples of the universal curve of resonance neutron self-shielding factors // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2004. – № 213. – P. 186–188.
5. Goncalves I.F., Martinho E., Salgado J. Monte Carlo calculation of epithermal neutron resonance self-shielding factors in foils of different materials // Applied Radiation and Isotopes. – 2002. – № 56. – P. 945–951.
6. Salgado J., Martinho E., Goncalves I.F. Epithermal neutron self-shielding factors in foils for collimated beams // Applied Radiation and Isotopes. – 2004. – V. 60. – P. 677–681.
7. Furcia H., Arribere M., Ribeiro Guevara S. Self-shielding corrections in cylindrical samples in gamma spectrometry with germanium well-type detectors // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2013. – V. 705. – P. 132–139.
8. Krar M.E., Milad K.F. Direct mathematical calculation of the self-shielding factor for cylindrical radioactive sources // Journal of Taibah University for Science. – 2015. – V. 2. – P. 62–69.
9. Safarzadeh O., Shirani A.S., Minuchehr A. Resonance self-shielding calculation using sub-group method and ABC algorithm // Progress in Nuclear Energy. – 2015. – V. 78. – P. 303–309.

10. Tzika F., Stamatelatos I.E. Thermal neutron self-shielding correction factors for large sample instrumental neutron activation analysis using the MCNP code // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2004. – V. 213. – P. 177–181.
11. Large Sample Neutron Activation Analysis: correction for neutron and gamma attenuation / F. Tzika, I.E. Stamatelatos, J. Kalf-Ezra, P. Bode // Nukleonika. – 2004. – V. 49 (1). – P. 115–121.
12. Nasrabadia M.N., Jalalib M., Mohammadi A. Calculation of thermal neutron self-shielding correction factors for aqueous bulk sample prompt gamma neutron activation analysis using the MCNP code // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section. – 2007. – V. 263 (2). – P. 473–476.
13. Quantitative evaluation of nuclide density distribution in a substance by neutron resonance absorption transmission method / H. Hasemi, M. Harada, T. Kai, H. Sato, M. Ooi, M. Segawa, T. Shinohara, K. Kino, T. Kamiyama, Y. Kiyanaagi // Physics Procedia. – 2014. – V. 60. – P. 244–253.
14. Lindstrom R.M., Fleming R.F. Neutron Self-Shielding Factors for Simple Geometries // Chem. Anal. – 2008. – V. 53. – P. 855–859.
15. Martinho E., Goncalves I.F., Salgado J. Universal curve of epithermal neutron resonance self-shielding factors in foils, wires and spheres // Applied Radiation and Isotopes. – 2003. – V. 58. – P. 371–375.
16. Yamamoto H., Yamamoto K. Self-Shielding Factors for Resonance Foils // Journal of Nuclear Science and Technology. – 1965. – V. 42. – P. 421–424.
17. Determination of Neutron Fluxes and Spectrum Shaping Factors in Irradiation Sites of Ghana's Miniature Neutron Source Reactor (MNSR) by Activation Method after Compensation of Loss of Excess Reactivity / R.B.M. Sogbadji, B.J.B. Nyarko, E.H.K. Akaho, R.G. Abrefah // World Journal of Nuclear Science and Technology. – 2011. – V. 1. – P. 50–56.
18. Tsubone I., Nakajima Y., Kanda Y. Resonance Parameters of Tantalum-181 in Neutron Energy Range from 100 to 4,300 eV // Journal of Nuclear Science and Technology. – 1987. – V. 24. – P. 975–987.
19. Ломакин С.С., Петров В.И., Самойлов П.С. Радиометрия нейтронов активационным методом. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 144 с.
20. Salgado J., Martinho E., Goncalves I.F. The calculation of neutron self-shielding factors of a group of isolated resonance // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2004. – V. 260 (2). – P. 317–320.

Поступила 11.02.2016 г.

Информация об авторах

Алейников Ю.В., начальник лаборатории физики реакторных установок Института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

Попов Ю.А., заместитель начальника лаборатории физики реакторных установок Института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

Прозорова И.В., начальник группы лаборатории физики реакторных установок Института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

UDC 621.039.84

CALCULATED DETERMINATION OF CORRECTIONS FOR RESONANCE SELF-SHIELDING OF ACTIVATION GOLD/TANTALUM DETECTORS AT IRRADIATION

Yury V. Aleynikov¹,
aleynikov@nnc.kz

Yury A. Popov¹,
Popov@nnc.kz

Irina V. Prozorova¹,
Prozorova@nnc.kz

¹ Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan,
10, Krasnoarmeyskaya street, Kurchatov, 71100, Republic of Kazakhstan.

The relevance of the discussed issue is caused by the need to evaluate the self-shielding factors in activation gold/tantalum indicators used while conducting Instrumental Neutron Activation Analysis by single-limit comparative method of k_0 -standartization. At irradiation of activation indicators the flux perturbation occurs due to neutrons absorption inside of the indicator material in the field of epithermal neutron nuclear reactor. This effect may have a great importance especially if indicator materials had resonances in this energy range. The self-shielding factor (G_{res}) should be considered at activation for taking into account the effect of the neutron flux perturbation. This factor depends on geometry and sample size as well as on physical and nuclear properties of isotope. The authors have proposed the curve, which agrees well with the experimental and the calculated values.

The main aim of the study is to identify the corrections on self-shielding of activation indicators under reactor irradiation.

Research methods: modeling and implementation of neutronic calculations of reaction rate of activation using MCNP5 program depending on indicators thickness and nuclear concentration of isotopes; selection of analytical dependencies for calculation of self-shielding factors.

Results. The paper introduces the results of neutronic calculations of self-shielding factors for activation gold/tantalum indicators, used as an indicator of activation by neutron irradiation. The authors obtained the dependences of correction factors on indicator thickness, the analytical formulas for the indicator and dependences of the reaction rate on the concentration of isotopes. The results of calculations will be used while conducting the Instrumental Neutron Activation Analysis for nuclear engineering structural materials by single-limit comparative method of k_0 -standartization at IVG.1M research reactor.

Key words:

Self-shielding factor, activation indicator, reaction rate, MCNP code, neutronic calculations.

REFERENCES

- Jagodish K Tuli. Nuclear Wallet cards (Sixth edition): National Nuclear Data Center for the U.S: Nuclear Data Program: Brookhaven National Laboratory. New York, Upton. 2000. Available at: <http://www.nndc.bnl.gov/wallet/wccurrent.html> (accessed 10 February 2016).
- X-5 Monte Carlo Team. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 5. Vol. I: Overview and Theory. Los Alamos National Laboratory Report: LA-UR-03-1987. 2003 (Revised 10/3/05). Available at: <http://www.nucleonica.net/wiki/images/8/89/MCNPvolI.pdf> (accessed 10 February 2016).
- MacFarlane R.E. New Thermal Neutron Scattering Files for ENDF/B-VI Release 2: Report LA-12639-MS (ENDF-356) UC-413: Los Alamos National Laboratory. 1994. Available at: <http://t2.lanl.gov/nis/publications/methods.pdf> (accessed 10 February 2016).
- Goncalves I.F., Martinho E., Salgado J. Extension to cylindrical samples of the universal curve of resonance neutron self-shielding factors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2004, no. 213, pp. 186–188.
- Goncalves I.F., Martinho E., Salgado J. Monte Carlo calculation of epithermal neutron resonance self-shielding factors in foils of different materials. *Applied Radiation and Isotopes*, 2002, no. 56, pp. 945–951.
- Salgado J., Martinho E., Goncalves I.F. Epithermal neutron self-shielding factors in foils for collimated beams. *Applied Radiation and Isotopes*, 2004, vol. 60, pp. 677–681.
- Furcia H., Arribere M., Ribeiro Guevara S. Self-shielding corrections in cylindrical samples in gamma spectrometry with germanium well-type detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2013, vol. 705, pp. 132–139.
- Krar M.E., Milad K.F. Direct mathematical calculation of the self-shielding factor for cylindrical radioactive sources. *Journal of Taibah University for Science*, 2015, vol. 2, pp. 62–69.
- Safarzadeh O., Shirani A.S., Minuchehr A. Resonance self-shielding calculation using sub-group method and ABC algorithm. *Progress in Nuclear Energy*, 2015, vol. 78, pp. 303–309.
- Tzika F., Stamatelatos I.E. Thermal neutron self-shielding correction factors for large sample instrumental neutron activation analysis using the MCNP code. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2004, vol. 213, pp. 177–181.
- Tzika F., Stamatelatos I.E., Kalef-Ezra J., Bode P. Large Sample Neutron Activation Analysis: correction for neutron and gamma attenuation. *Nukleonika*, 2004, vol. 49 (1), pp. 115–121.
- Nasrabadia M.N., Jalalib M., Mohammadi A. Calculation of thermal neutron self-shielding correction factors for aqueous bulk sample prompt gamma neutron activation analysis using the MCNP code. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section*, 2007, vol. 263 (2), pp. 473–476.
- Hasemi H., Harada M., Kai T., Sato H., Ooi M., Segawa M., Shinohara T., Kino K., Kamiyama T., Kiyanagi Y. Quantitative evaluation of nuclide density distribution in a substance by neutron resonance absorption transmission method. *Physics Procedia*, 2014, vol. 60, pp. 244–253.

14. Lindstrom R.M., Fleming R.F. Neutron Self-Shielding Factors for Simple Geometries. *Chem. Anal.*, 2008, vol. 53, pp. 855–859.
15. Martinho E., Goncalves I.F., Salgado J. Universal curve of epithermal neutron resonance self-shielding factors in foils, wires and spheres. *Applied Radiation and Isotopes*, 2003, vol. 58, pp. 371–375.
16. Yamamoto H., Yamamoto K. Self-Shielding Factors for Resonance Foils. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1965, vol. 42, pp. 421–424.
17. Sogbadji R.B.M., Nyarko B.J.B., Akaho E.H.K., Abrefah R.G. Determination of Neutron Fluxes and Spectrum Shaping Factors in Irradiation Sites of Ghana's Miniature Neutron Source Reactor (MNSR) by Activation Method after Compensation of Loss of Excess Reactivity. *World Journal of Nuclear Science and Technology*, 2011, vol. 1, pp. 50–56.
18. Tsubone I., Nakajima Y., Kanda Y. Resonance Parameters of Tantalum-181 in Neutron Energy Range from 100 to 4,300 eV. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1987, vol. 24, pp. 975–987.
19. Lomakin S.S., Petrov V.I., Samoylov P.S. *Radiometriya neytronov aktivatsionnym metodom* [Neutron radiometry by the activation method]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 144 p.
20. Salgado J., Martinho E., Goncalves I.F. The calculation of neutron self-shielding factors of a group of isolated resonance. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2004, vol. 260 (2), pp. 317–320.

Received: 11 February 2016.

Information about the authors

Yury V. Aleynikov, Chief of the laboratory, Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan.

Yury A. Popov, deputy chief of the laboratory, Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan.

Irina V. Prozorova, Head of the group, Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan.