

УДК 621.039.564

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦА НА
ИЗМЕРЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ МАССЫ ПЛУТОНИЯ-240 МЕТОДОМ
МНОЖЕСТВЕННОСТИ НЕЙТРОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЧЕТЧИКА
RENMC**

Д.А. Владимиров, О.С. Прошкина, В.Ю. Рогожкин, Н.В. Сычева
*АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганиче-
ских материалов имени академика А.А. Бочвара», Москва*

В статье приведена расчетно-экспериментальная оценка метрологических характеристик методики измерений эффективной массы плутония-240 методом множественности нейтронов, которая выполнена с помощью математического моделирования нейтронных процессов в детекторе и измерений комплексным методом. Методика применяется в лаборатории ядерно-физических исследований АО «ВНИИИМ» для анализов в целях государственного учета и контроля ядерных материалов и для контроля характеристик плутония при изготовлении экспериментального топлива. Представлены оценки смещения результатов измерений в оксидах, нитридах, топливных таблетках МОХ- и СНУП-топлива, скрапе в виде смесей порошков оксидов плутония и урана, вызванного различием свойств калибровочных образцов из металлического плутония и анализируемых образцов. Был расширен диапазон значений коэффициента умножения нейтронов утечки до 1,272 включительно, и диапазон эффективной массы плутония-240 до 70 г включительно. Описаны составляющие неопределенности измерений, которую рассчитывают в соответствии с руководством ЕВРАХИМ/СИТАК «Количественное описание неопределенности в аналитических измерениях». На основании выполненных исследований были уточнены приписанные методике характеристики погрешности измерений. Оценена характеристика неисключенной систематической составляющей погрешности, включающая в себя показатель правильности, погрешность калибровки детектора и погрешность аттестованного значения образцов, использованных для калибровки.

Ключевые слова: метод множественности нейтронов, численное моделирование, калибровочные коэффициенты, эффективная масса ^{240}Pu , спектр нейтронов, RENMC, аттестованный объект.

**EVALUATION OF SAMPLE PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES
INFLUENCE ON PLUTONIUM-240 EFFECTIVE MASS MEASUREMENTS BY THE
NEUTRON MULTIPLICITY METHOD USING THE RENMC COUNTER***D.A. Vladimirov, V.Yu Rogozhkin, O.S. Proshkina, N.V. Sycheva**JSC «A.A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials», Moscow*

Calculated and experimentally evaluated metrological characteristics of neutron multiplicity technique for plutonium-240 effective mass measurements are performed using of mathematical model and complex gamma-ray, calorimetric and neutron estimations. The technique is applied in NDA Laboratory of JSC «VNIINM» for nuclear materials to be analyzed for NMA purposes and to support experimental fuel fabrication. Evaluated bias that caused by different properties of calibration metallic plutonium samples and analyzed samples of oxides, nitrides, MOX and SNUP fuel pellets, mixed plutonium and uranium oxide scrap is presented. The range of leakage neutron multiplication factor values up to 1.272, and the range of plutonium-240 effective mass values up to 70 g are considered. In result of measurement the expanded relative uncertainty with a coverage factor of 2 (confidence level 0.95) is calculated in accordance with the EURACHEM/SITAC Guide «Quantification of Uncertainty in Analytical Measurements». Also systematic error attributed to technique including components of trueness, accuracy of detector calibration and certification accuracy of samples used for calibration has been estimated.

Keywords: neutron multiplicity method, numerical modeling, calibration coefficients, ²⁴⁰Pu effective mass, neutron spectrum, RENMC, certified object.

Введение

Метод множественности нейтронов применяется для неразрушающего измерения скорости спонтанного деления (эффективной массы плутония-240) образца плутония путем регистрации одиночных нейтронов, двойных и тройных нейтронных совпадений с использованием детекторов колодезного типа с регистром сдвига [1]. Он позволяет измерять массу плутония в образцах в диапазоне от нескольких граммов до килограммов.

Метод требует предварительной калибровки детектора по эффективности регистрации ϵ и коэффициенту отбора совпадений χ . Для повышения точности анализа в лаборатории ядерно-физических исследований АО «ВНИИИИМ» был разработан способ калибровки по плутониевым образцам, аттестованным по изотопному составу и массе, в котором калибровочные коэффициенты оценивают с применением подхода Фейнмана [2]. Измерения проводят по методике, в которой счетчик множественности RENMC (ЛАНЛ США) [3] откалиброван по аттестованным объектам металлического плутония АО 95 505/531-44-2021. Однако на практике методика применяется не только для анализа металла, но и соединений плутония: оксидов, нитридов, топливных таблеток

МОХ- и СНУП-топлива, скрапов в виде смесей порошков оксидов плутония и урана. Это приводит к систематической погрешности, связанной с отличием нейтронных свойств анализируемых образцов от калибровочных.

Цель настоящей работы состояла в расчетно-экспериментальной оценке смещения результатов измерений в зависимости от вида анализируемого материала и от других влияющих факторов. Оценка выполнена с помощью математического моделирования нейтронных процессов в детекторе и измерений изотопного состава и массы плутония комплексным методом.

Описание измерений и расчетной модели

Общий вид счетчика RENMC представлен на рис. 1. В счетчике имеются 115 газоразрядных детекторов с ^3He под давлением 10 атмосфер диаметром 2,45 см и активной длиной 76 см, вставленных в полиэтиленовую матрицу. Число детекторов в 1-ом (от полости), 2-ом, 3-ем, 4-ом кольцах составляет 24, 30, 29, 32 соответственно. Счетчик имеет 26 счетных каналов, в каждом из которых задействованы от 3 до 6 детекторов с ^3He , соединенных с каждым каналом усилителя «Amptek». Между полиэтиленовой матрицей с детекторами с ^3He и измерительной полостью расположен слой кадмия, который поглощает образующиеся в полиэтилене тепловые нейтроны, предотвращая тем самым их возвращение в измеряемый образец и индуцирование дополнительных актов деления. Сверху и снизу измерительной полости расположены графитовые торцевые заглушки толщиной в 15,2 см, предназначенные для уменьшения утечки нейтронов из полости. Дополнительный слой кадмия окружает полиэтиленовую матрицу с трубками с ^3He снаружи, между слоем кадмия и стенкой корпуса счетчика находится не менее 5 см полиэтилена. Для счета совпадений использован блок электроники AMSR (усовершенствованный сдвиговый регистр множественности). В качестве программного обеспечения счетчика множественности нейтронов применяется русифицированная версия программы обработки измерений нейтронных совпадений INCC 1.0x [4]. Во всех экспериментах ширина ворот совпадений была установлена $T=32$ мкс, предварительная задержка $P=2$ мкс.

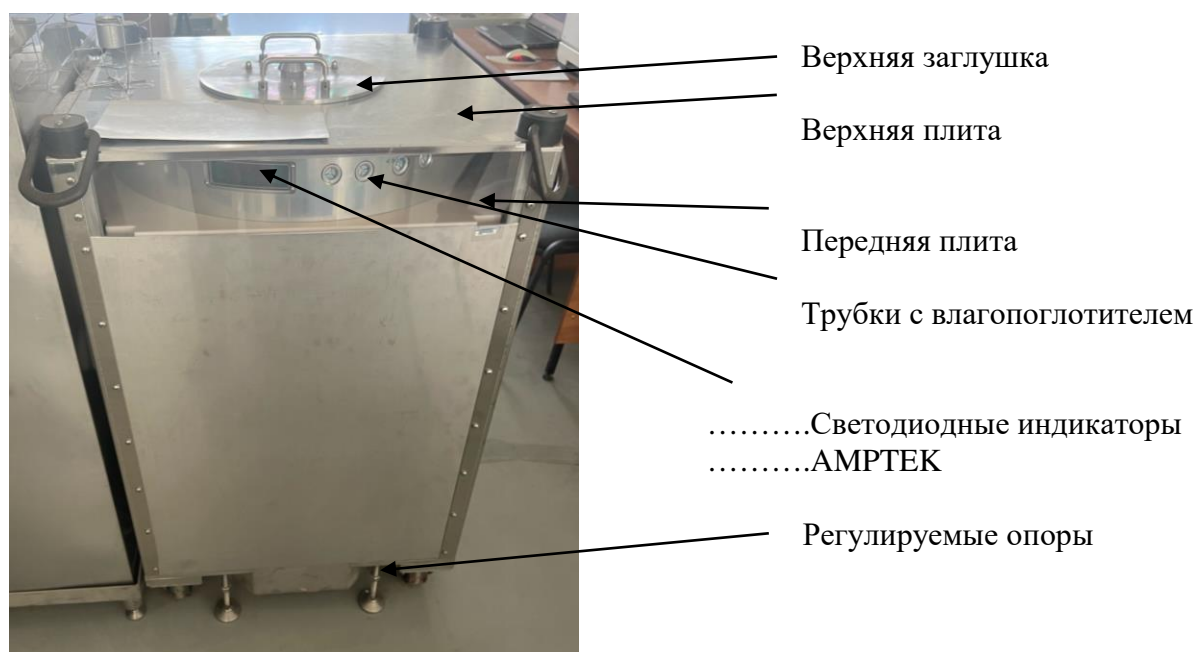


Рис. 1. Общий вид счетчика RENMC

Модель счетчика множественности надтепловых нейтронов RENMC разработана в программной среде Serpent с использованием комбинаторной геометрии [5], [6]. Расчеты проведены методом Монте-Карло с библиотеками ядерных данных ENDF/B-VII.0 и JEFF-3.1.1 [7]. Спектр и выход нейтронов (α, n)-реакций рассчитан по программе NEDIS 2.0 [8]; эти данные вводились в Serpent как исходные параметры внешнего источника. Схема счетчика RENMC представлена в двух проекциях на рис. 2 и рис. 3.

По программе Serpent рассчитывали эффективный коэффициент размножения нейтронов и скорости следующих процессов: поглощения в ^3He -счетчиках (скорость счета нейтронов N_{1p}), вынужденного деления (S_f), рождения нейтронов вынужденного деления ($v_f S_f$), скорость потерь нейтронов (S_{LOSS}). Кроме того, по программе Serpent методом прямого моделирования рассчитывали время замедления l_{slow} и время диффузии тепловых нейтронов l_{therm} . По результатам расчета оценивали эффективность регистрации нейтронов ε_p и коэффициент отбора совпадений χ_p .

Эффективность регистрации нейтронов определяли, как отношение скорости счета к суммарной мощности источника (спонтанное деление, (α, n) - реакция, вынужденное деление) по формуле (1):

$$\varepsilon_p = N_{1p} / [v_{cn} S_{cn} (1 + \alpha_p) + v_f S_f] \quad (1)$$

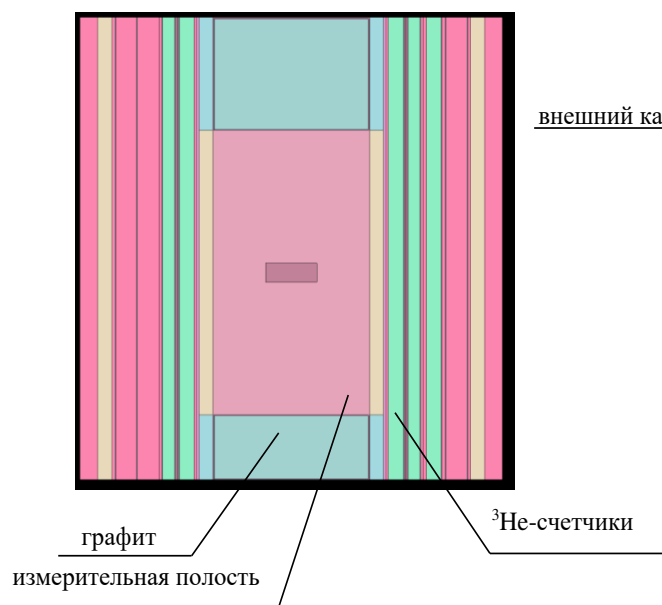


Рис. 2. Схема счетчика RENMC
в разрезе

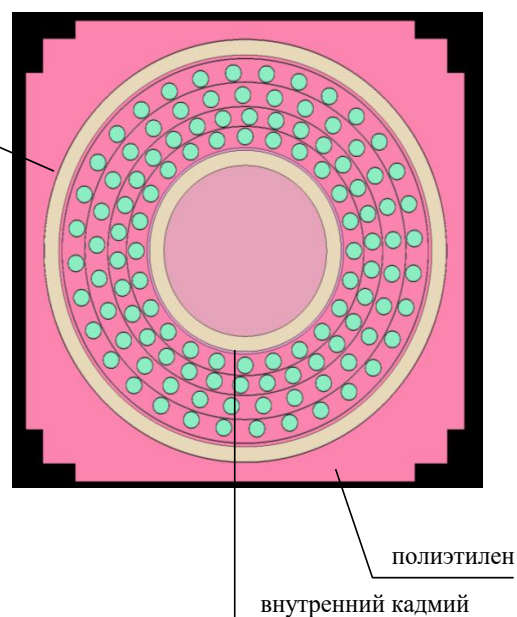


Рис. 3. Схема счетчика RENMC
вид сверху

Отношение числа (α, n) -нейтронов к числу нейтронов спонтанного деления α_p и скорость спонтанного деления S_{sp} рассчитывали по программе NEDIS 2.0. Для металлического плутония и СНУП-топлива без примесей принимали $\alpha_p = 0$.

Коэффициент отбора совпадений определяли через время жизни нейтрона в установке по формуле (2):

$$\chi_p = e^{-P/l} \times (1 - e^{-T/l}) \quad (2)$$

где l – время жизни нейтрона в детекторе до поглощения или утечки

$P = 2$ мкс – предварительная задержка открытия ворот совпадений после регистрации нейтрона;

$T = 32$ мкс – ширина ворот совпадений.

Для оценки полного времени жизни в $l_{Serpent} = l_{slow} + l_{therm}$ вводили поправку на поглощение нейтронов в делящемся материале по формуле (3):

$$l = l_{serpent} \left(1 - \frac{S_f}{S_{LOSS}} \right), \quad (3)$$

Разработанная модель счетчика множественности верифицирована по скорости счета нейтронов на доступных образцах плутониевых материалов: расхождения расчетных и измеренных значений не превышают 3 % [6].

Корректировка калибровочных коэффициентов

К смещению результатов измерений приводят различия свойств калибровочного (стандартного) и анализируемого образцов. Корректировка этого смещения путем передачи размера калибровочных коэффициентов (эффективности регистрации и коэффициента отбора совпадений) от стандартного образца к анализируемому проводилась по аналогии с алгоритмом ОСТ 95 10597 с использованием в качестве модели сравнения математической модели, построенной в программной среде Serpent по формулам [6], [9], [10]:

$\varepsilon = \varepsilon_{\text{ст}} \cdot \varepsilon_{\text{р}} / \varepsilon_{\text{р ст}}$ и $\chi = \chi_{\text{ст}} \cdot \chi_{\text{р}} / \chi_{\text{р ст}}$, где ε, χ – калибровочные коэффициенты с поправкой; $\varepsilon_{\text{ст}}, \chi_{\text{ст}}$ – экспериментальные калибровочные коэффициенты для стандартного образца; $\varepsilon_{\text{р}}, \chi_{\text{р}}$ – расчетные калибровочные коэффициенты для анализируемого образца; $\varepsilon_{\text{р ст}}, \chi_{\text{р ст}}$ – расчетные калибровочные коэффициенты для стандартного образца.

Смысл такой корректировки состоит в том, что если и числитель, и знаменатель умножить на действительное значение калибровочного коэффициента, например, эффективности $\varepsilon_{\text{э}}$, то при одинаковом относительном смещении расчетных значений их отношение к наблюдаемым будет одинаково: $\varepsilon_{\text{р}} / \varepsilon_{\text{э}} = \varepsilon_{\text{р ст}} / \varepsilon_{\text{э ст}}$, и тогда скорректированные значения будут соответствовать действительным: $\varepsilon = \varepsilon_{\text{э}}$. Равенство $\varepsilon_{\text{р}} / \varepsilon_{\text{э}} = \varepsilon_{\text{р ст}} / \varepsilon_{\text{э ст}}$ выполняется, если стандартный образец по нейтронным свойствам идентичен анализируемому.

Таким образом, оценкой смещения является разность (размах) между результатом измерения до корректировки и результатом после корректировки калибровочных коэффициентов.

Влияние умножения нейтронов. Оценка систематической составляющей погрешности, обусловленной процедурой корректировки калибровочных коэффициентов

Основным влияющим на точность методики корректировки фактором является вынужденное деление, мерой которого служит коэффициент умножения нейтронов утечки. Оценка систематической составляющей погрешности, обусловленной процедурой корректировки калибровочных коэффициентов, была проведена с использованием образцов металлического плутония АО 106 – АО 506, аттестованные значения массы плутония и эффективной массы плутония-240 которых приведены в табл. 1 (аттестованные объекты металлического плутония АО 95 505/531-44-2021).

Таблица 1

Характеристики аттестованных объектов металлического плутония

Образец	Масса плутония, г	Эффективная масса плутония-240, г
АО 106	2,239±0,010	0,1123±0,0007
АО 206	5,507±0,010	0,2762±0,0014
АО 306	18,270±0,014	0,9163±0,0045
АО 406	58,270±0,035	2,922±0,014
АО 506	160,85±0,09	8,067±0,040

Для образцов АО 206 – АО 506 по скоростям счета, измеренным при калибровке детектора с ними, были рассчитаны значения эффективной массы плутония-240 с использованием калибровочных коэффициентов, установленных для других образцов – образцов для корректировки. Для корректировки брали такие образцы из имеющихся, коэффициенты умножения нейтронов для которых наиболее близки к анализируемому: для АО 206 брали АО 106, для АО 306 – АО 206 и т.д. В этом случае экспериментальный результат совпадает с аттестованным значением, так как методика калибровки не смещена по эффективной массе плутония-240. Поэтому смещение скорректированного значения относительно аттестованного, вызванное различием коэффициентов умножения анализируемого образца и образца для корректировки, характеризует точность методики корректировки.

Результаты оценки систематической составляющей погрешности, обусловленной процедурой корректировки калибровочных коэффициентов, приведены в табл. 2: в диапазоне коэффициента умножения до 1,272 максимальный размах между результатами измерений эффективной массы плутония-240, полученными до и после корректировки калибровочных коэффициентов, не превышает 1,5 %.

Таблица 2

Результаты оценки систематической составляющей погрешности, обусловленной процедурой корректировки калибровочных коэффициентов

Анализируемый образец		Стандартный образец, использованный для корректировки калибровочных коэффициентов		Смещение результатов измерений эффективной массы плутония-240, %
Образец	Экспериментальный коэффициент умножения	Образец	Расчетный коэффициент умножения	
АО 206	1,076±0,004	АО 106	1,045	-0,08
АО 306	1,118±0,004	АО 206	1,062	+1,30
АО 406	1,175±0,006	АО 306	1,097	+1,47
АО 506	1,272±0,007	АО 406	1,152	+1,18

Влияние плутония-242

Для расчета калибровочных коэффициентов необходимы исходные данные о массе и изотопном составе плутония в анализируемом образце. Эти данные берут из аттестованных характеристик, а при их отсутствии из результатов анализа комплексным методом [1], который предусматривает выполнение гамма-спектрометрических, калориметрических и нейтронных измерений. Процедуру анализа можно представить в виде следующей последовательности действий: вначале на основании гамма-спектрометрических и калориметрических измерений оценивают массу всех изотопов плутония, кроме изотопа плутония-242, а затем оценивают массу плутония-242 по измеренной методом множественности нейтронов эффективной массе плутония-240 и массе плутония-238, плутония-240. При этом возможно смещение результата измере-

ния эффективной массы плутония-240 из-за того, что в нейтронометрическом анализе калибровочные коэффициенты не соответствуют количеству плутония-242 в образце.

Для оценки влияния плутония-242 были выполнены расчеты калибровочных коэффициентов для образца СНУП и для образцов металлического плутония АО 406, АО 506, в которых массовая доля плутония-242 была численно увеличена до 10%. Оценки смещения результатов измерений эффективной массы плутония-240 с измененными калибровочными коэффициентами относительно исходных представлены в табл. 3.

Таблица 3

Оценка влияния состава на смещение	
Образец	Смещение, %
СО СНУП	+0,03
АО 406	+0,13
АО 506	+0,17

Результаты оценок смещения показали, что влияние изменения массовой доли плутония-242 в плутонии на эффективную массу плутония-240 при корректировке пренебрежимо мало. Следовательно, результаты комплексного анализа могут быть использованы в качестве исходных данных для расчета калибровочных коэффициентов при оценке смещений.

Влияние неизвестных легких примесей

В ряде образцов СНУП- и МОКС-топлива, а также во всех образцах скрапа присутствуют неизвестные примеси-мишени (α , n)-реакции. Неучет этих примесей в расчете источника нейтронов приводит к занижению скорости счета на 10-15% и влияет на оценку калибровочных коэффициентов [8]. Для демонстрации данного эффекта был проведен расчет калибровочных коэффициентов в зависимости от параметра α_p в диапазоне от $\alpha_p = 0$ до $\alpha_p = 2,5$ для образца порошка диоксида плутония массой 150 г - рис. 4 и 5: с ростом параметра α_p происходит ужесточение спектра, из-за чего эффективность регистрации нейтронов и коэффициент отбора совпадений уменьшаются.

Для устранения несоответствия расчетных и наблюдаемых характеристик источника нейтронов подобных образцов в исходных данных программы Serpent увеличивали концентрацию примесей (фтора, кислорода или воды – в зависимости от имеющейся информации) до тех пор, пока рассчитанная скорость счета нейтронов не становилась равной измеренной, и соответствующие такому составу образцов параметры нейтронного поля принимали для корректировки калибровочных коэффициентов. При оценке смещения эта процедура была применена к образцам Маяк-1, ОБ-1, А1112-9, Т24, 2М и для всех образцов скрапа Х-1 – Х-6 (табл. 4).

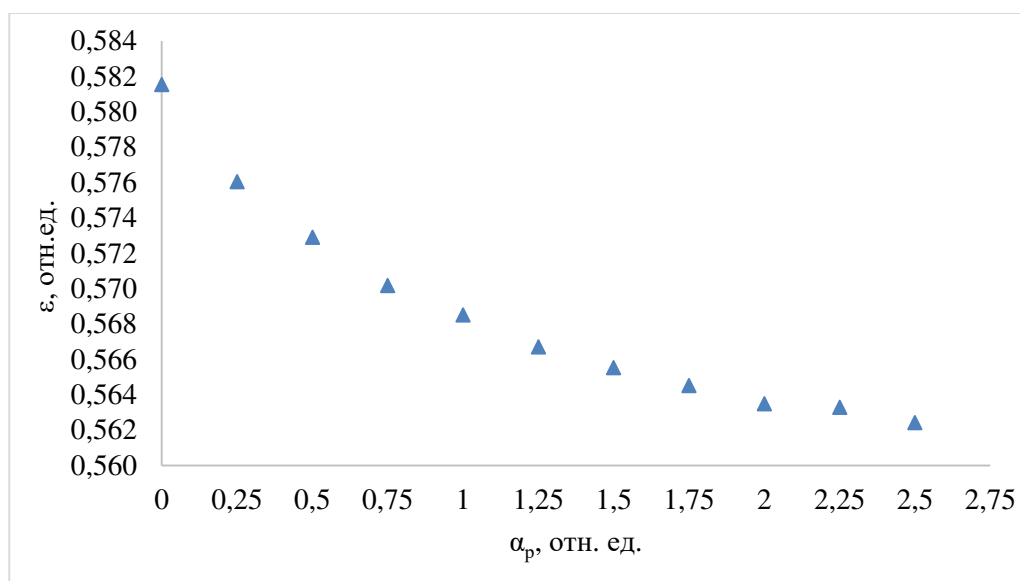


Рис. 4. Зависимость эффективности регистрации нейтронов от параметра α

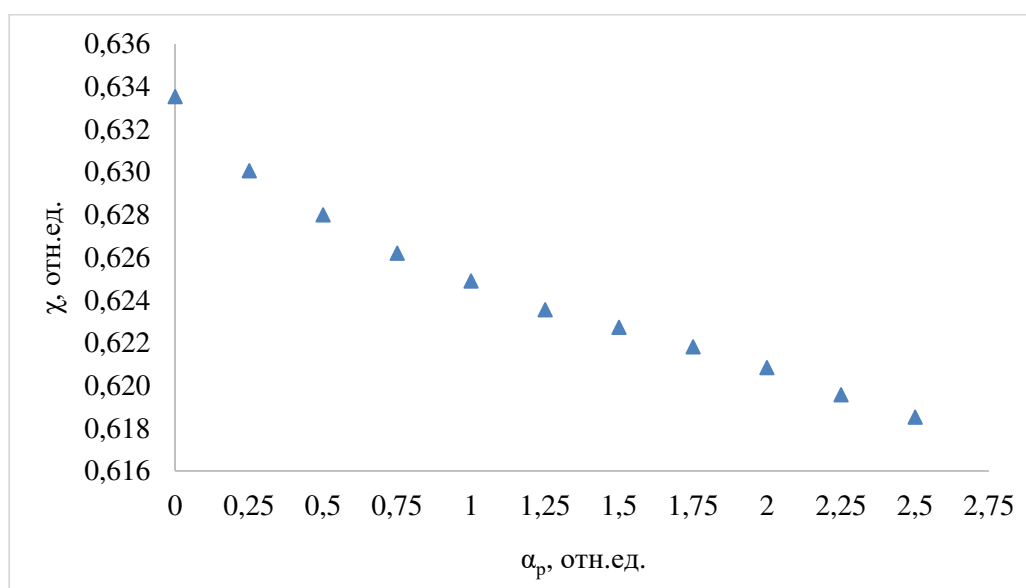


Рис. 5. Зависимость коэффициента отбора совпадений нейтронов от параметра α

Результаты оценки смещения

В табл. 4 представлены оцененные значения смещения результатов измерений эффективной массы плутония-240. Перечень проанализированных образцов включает:

- стандартные образцы изотопного состава плутония в диоксиде плутония «ГСО – 1» - индекс стандартного образца в составе комплекта 1, «ГСО – 4» - индекс стандартного образца в составе комплекта 4 (в табл. 4 приведены значения массы плутония, рассчитанные по дополнительным характеристикам – массе диоксида плутония и мас-

совой доле плутония в диоксиде, также приведены значения эффективной массы плутония-240, рассчитанные по массе и изотопному составу плутония);

- диоксид плутония в упаковке ТУК-30 «Маяк-1» (в табл. 4 приведены значения массы плутония, оцененной по результатам исследований, описанных в работе [1], эффективная масса плутония-240 измерена нейтронометрическим методом с калибровочными коэффициентами для образца АО 406);

- диоксид плутония в стальном контейнере «Контейнер» (в табл. 4 приведены значения массы плутония и эффективной массы плутония-240, измеренные комплексным методом с калибровочными коэффициентами для образца АО 106);

- образцы СНУП-топлива и СНУП-топлива с примесями в пластиковых контейнерах (в табл. 4 приведены значения массы плутония и эффективной массы плутония-240, измеренные комплексным методом с калибровочными коэффициентами для образца АО 106);

- образцы МОКС-топлива и МОКС-топлива с примесями в пластиковых контейнерах (в табл. 4 приведены значения массы плутония и эффективной массы плутония-240, измеренные комплексным методом с калибровочными коэффициентами для образца АО 106);

- скрап в виде смешанных оксидов урана и плутония (в табл. 4 приведены значения массы плутония и эффективной массы плутония-240, измеренные комплексным методом с калибровочными коэффициентами для образца АО 106).

Смещение было оценено как разность между измеренным и скорректированным значениями эффективной массы плутония-240 для всех образцов, кроме ГСО – 1 и ГСО – 4, для которых вместо скорректированного принимали значение, рассчитанное по аттестованным характеристикам.

Метрологические характеристики методики измерений

Расширенную относительную неопределенность с коэффициентом охвата 2 (доверительной вероятностью 0,95) результата измерения эффективной массы плутония-240 рассчитывают в соответствии с руководством ЕВРАХИМ/СИТАК "Количественное описание неопределенности в аналитических измерениях" [11] по формуле (4):

$$U = 2u_c, \quad (4)$$

где u_c – суммарная неопределенность.

Суммарную неопределенность измерений эффективной массы плутония-240 рассчитывают по формуле (5):

$$u_c = \sqrt{u_B^2 + u_K^2 + u_{cx}^2}, \quad (5)$$

u_K – стандартная неопределенность калибровки детектора множественности, которая оценивается по типу А при калибровке детектора;

u_{cx} – стандартная неопределенность сходимости измерений, которая оценивается по типу А по результатам многократных (не менее 100) измерений;

Таблица 4

Оценка влияния состава на смещение

№	Материал	Обозначение образца	Масса Pu, г	Эфф. масса Pu-240, г	Смещение, %
1	Диоксид плутония, порошок	ГСО-1	2,819±0,008	0,164±0,001	1,77
2	Диоксид плутония, порошок	ГСО-4	2,819±0,008	0,592±0,001	1,49
3	Диоксид плутония, порошок	Маяк-1	1720±11	72,4±1,7	3,00
4	Диоксид плутония, порошок	Контейнер	132,3±1,4	5,41±0,08	1,43
5	СНУП, (U,Pu,Np)N топливные таблетки	СО СНУП	11,96± 0,12	0,5085± 0,008	-1,75
6	СНУП, (U,Pu,Np,Am)N, порошок	РТ-393	20,25±0,42	0,86±0,01	-1,32
7	СНУП, (U,Pu,Np)N, топливные таблетки	154А	40,5±0,5	1,697±0,024	-1,31
8	СНУП, (U,Pu, Np)N, топливные таблетки	154-ч2	68,0±1,1	2,875±0,040	-1,51
9	СНУП, (U,Pu,Np)N, топливные таблетки	155-ч1	98,1±1,2	4,137±0,057	-1,70
10	СНУП, (U,Pu)N с примесями, топливные таблетки	ОБ-1	10,28±0,11	0,472±0,007	-0,31
11	СНУП, (U,Pu,Am)N с примесями, топливные таблетки	A1112-9	17,96±0,19	1,90±0,03	0,85
12	СНУП, (U,Pu,Am)N с примесями, топливные таблетки	T24	17,81±0,21	1,90±0,03	1,34
13	СНУП, (U,Pu,Am)N с примесями, топливные таблетки	2М	18,87±0,38	2,05±0,03	1,70
14	МОКС, (U,Pu)O ₂ , топливные таблетки	Об-5	14,11±0,15	0,586±0,009	2,79
15	МОКС, (U,Pu,Am)O ₂ , порошок	A1112-C	17,80±0,33	1,86±0,03	2,53
16	МОКС, (U,Pu,Am)O ₂ , порошок	В4	20,0±0,6	2,12±0,76	2,36
17	МОКС, (U,Pu)O ₂ , топливные таблетки	M1122-Ok	15,6±1,0	0,65±0,01	2,92
18	Скрап, (U,Pu)O ₂ + матрица, порошок	X-1	49,4±1,0	2,28±0,14	1,90
19	Скрап, (U,Pu)O ₂ + матрица, порошок	X-2	54,8±1,1	2,51±0,15	2,48
20	Скрап, (U,Pu)O ₂ + матрица, порошок	X-3	41,5±1,0	1,98±0,15	2,39
21	Скрап, (U,Pu)O ₂ + матрица, порошок	X-4	61,6±1,0	3,01±0,16	2,51
22	Скрап, (U,Pu)O ₂ + матрица, порошок	X-5	23,41±0,88	1,13±0,24	2,24
23	Скрап, (U,Pu)O ₂ + матрица, порошок	X-6	11,68±0,97	0,58±0,44	2,43

Стандартную неопределенность измерений эффективной массы плутония-240 по типу В рассчитывают по формуле (6):

$$u_B = \sqrt{b_{method}^2/3 + b_{bias}^2/3 + (u_{st})^2} , \quad (6)$$

u_{st} – стандартная неопределенность эффективной массы плутония-240 в образце, по которому проводилась калибровка. Значение u_{st} оценивают по типу В с использованием аттестованных характеристик образцов металлического плутония.

Остальные составляющие оценивают по типу В по результатам настоящей работы:

$b_{method} = 1,5\%$ – максимальное смещение, обусловленное методом корректировки калибровочных коэффициентов (табл. 2);

$b_{bias} = 3\%$ – максимальное смещение, связанное с отличием анализируемого диоксида плутония, МОКС-топлива и скрапа от металлического калибровочного образца (табл. 4);

$b_{bias} = 2\%$ – максимальное смещение, связанное с отличием анализируемого СНУП-топлива от металлического калибровочного образца (табл. 4).

При установлении приписанной методике погрешности характеристику правильности оценивают по формуле (7):

$$\theta_C = 1,1\sqrt{b_{method}^2 + b_{bias}^2} . \quad (7)$$

Для диоксида плутония, МОКС-топлива и скрапа $\theta_C = 3,7\%$. Для СНУП-топлива $\theta_C = 2,8\%$

В характеристику неисключенной систематической погрешности дополнительно вносят вклад составляющие, связанные с калибровкой детектора и точностью аттестации образцов, использованных для калибровки:

$$\theta = \sqrt{\theta_C^2 + (2u_k)^2 + (2u_{st})^2} . \quad (8)$$

Для диоксида плутония, МОКС-топлива и скрапа $\theta = 3,8\%$. Для СНУП-топлива $\theta = 2,8\%$.

Характеристика сходимости была установлена с использованием результатов измерений эффективной массы плутония-240, полученных при анализе реальных объектов измерений, значение характеристики сходимости составляет $\sigma_{сх}(\delta) = 0,84\%$.

Доверительные границы суммарной погрешности при $n=1$ при $P=0,95$:

– для диоксида плутония, МОКС-топлива и скрапа $\delta = \pm 4,1\%$;

– для СНУП-топлива $\delta = \pm 3,3\%$.

Диапазон измерений эффективной массы плутония-240 был расширен до 70 г (максимальное значение среди проанализированных образцов – «Маяк-1»).

Диапазон коэффициента умножения - до 1,272 (максимальное значение среди образцов металлического плутония, использованных для калибровки детектора – «АО 506»).

Выводы

С использованием математической модели счетчика RENMC выполнена оценка смещения измерений эффективной массы плутония-240, связанного с отличием свойств анализируемых образцов диоксида плутония, МОКС-топлива, скрапа, СНУП-топлива от металлического плутония, использованного для калибровки детектора. Результат представлен в виде двух составляющих: максимального смещения, связанного с погрешностью метода корректировки калибровочных коэффициентов, и максимального смещения, зависящего от вида материала. Оценка смещения выполнена в диапазоне значений коэффициента умножения нейтронов утечки до 1,272 и в диапазоне значений эффективной массы плутония-240 до 70 г. На основании выполненных исследований были уточнены приписанные методике характеристики погрешности измерений.

Список литературы

1. Горбунова А.Ю. *Комплексный метод неразрушающих измерений изотопного состава и массы плутония //Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук//, г. Москва, АО «ВНИИНМ», 2023 г.*
2. Горбунова, А.Ю. Калибровка детекторов множественности нейтронов / А.Ю. Горбунова, В.Ю. Рогожкин // *Атомная энергия. – 2015. – Т. 119, № 3. – С.168–173.*
3. W.N. Geist, C.D. Rael, K. Kroncke, C. Horley, M. Newell “*The Russian Epithermal Neutron Multiplicity Counter (RENMC)*”. LA-UR-03-4077. 2002.
4. N. Harker, M. S. Krick. “*Russian ARIES INCC Software User’s Manual*”. LA-UR-02-389. 2002 .
5. Leppänen J. *Serpent — a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code, User’s Manual. –VIT Technical Research Centre of Finland, 2015.*
6. Владимиров Д.А., Рогожкин В.Ю., Власкин Г.Н., Алеева Т.Б. / *Расчет калибровочных коэффициентов метода множественности нейтронов измерения эффективной массы плутония-240 // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы – 2024 - №. 4 С. 16-28.*
7. *Научно–методическая информационная база для ядерно-технологических расчетов – URL: http://ndc.gstu.by/data_rus.html (дата обращения: 18.04.2024).*
8. Власкин Г.Н. / *Программа NEDIS2.0 для расчета выхода и спектров нейтронов, образующихся в (α, n)-реакциях на ядрах легких элементов и за счет спонтанного деления» // Препринт ВНИИНМ 06-1, ВНИИНМ, 2006.*
9. Владимиров Д.А., Рогожкин В.Ю., Алеева Т.Б., Горбунова А.Ю., Пугачев П.А. / *Численное моделирование измерений характеристик образцов плутония на счетчике нейтронных совпадений AWCC // Атомная энергия – 2024. – Т. 136, № 3-4 С. 124-130.*
10. Владимиров Д.А., Рогожкин В.Ю., 2024. *Измерение массы плутония в РАО методом множественности нейтронов. // Вопросы атомной науки и техники, Серия: материаловедение и новые материалы – 2024- №. 3(124) С.105-113*
11. S. L. R. Ellison, A. Williams *EURACHEM/CITAC Guide Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement – EURACHEM – 2012 – 133 с.*