

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ПРИ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ АКТИВНОСТИ ОБРАЗЦОВ С ОСОБЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

*Степалин Иван Александрович (Stepalin\_IA@nrcki.ru), Волкович Анатолий Григорьевич, Иванов Олег Петрович, Смирский Юрий Николаевич, Степанов Алексей Вячеславович, Потанов Виктор Николаевич*

НИЦ «Курчатовский институт», Москва

В работе приведены результаты решения двух спектрометрических задач, связанных с определением активности источника. При этом источники обладали особенностями, делавшими применение стандартного спектрометрического метода затруднительным.

В первой задаче требовалось определить выгорание ядерного топлива реактора «Ромашка». Искомую величину было предложено искать спектрометрическим способом через определение количества оставшегося в нем изотопа Cs<sup>137</sup>. Применение метода Монте-Карло позволило обойти трудности, вызванные сложной геометрией тепловыделяющей сборки (ТВС), неоднородностью топлива в них, а также их высокой активностью.

Вторая задача состояла в определении активности водного раствора Al<sup>26</sup>. Ввиду слабой активности образца, отсутствия эталонного источника, а также эффекта суммирования гамма-квантов использование стандартного спектрометрического метода также было сопряжено с известными трудностями. Необходимые для определения активности калибровочные коэффициенты были получены путем численного моделирования в программе MCNP4, использующей метод Монте-Карло.

**Ключевые слова:** метод Монте-Карло, активность, реактор «Ромашка», алюминий-26.

## USAGE OF THE MONTE-CARLO METHOD IN SPECTROMETRIC MEASUREMENTS OF THE ACTIVITY OF SAMPLES WITH SPECIAL CHARACTERISTICS

*Stepalin Ivan Alexandrovich (Stepalin\_IA@nrcki.ru), Volkovich Anatoly Grigorievich, Ivanov Oleg Petrovich, Simirskii Yuri Nikolaevich, Stepanov Alexey Vyacheslavovich, Potanov Viktor Nikolaevich*

NRC «Kurchatov Institut», Moscow

The paper presents the results of solving two spectrometric problems related to determining the source activity. At the same time, the sources had features that made the use of the standard spectrometric method difficult.

In the first task, it was required to determine the burn-up of the nuclear fuel of the Romashka reactor. It was proposed to search for the desired value by the spectrometric method by determining the amount of the Cs-137 isotope remaining in it. The use of the Monte Carlo method made it possible to bypass the difficulties caused by the complex geometry of fuel assemblies, the inhomogeneity of the fuel in them, and also their high activity.

The second task was to determine the activity of an aqueous solution of Al-26. Due to the weak activity of the sample, the absence of a reference source, and the effect of summation of gamma quanta, the use of the standard spectrometric method was also associated with certain difficulties. The calibration coefficients necessary to determine the activity were obtained by numerical simulation in the MCNP4 program using the Monte Carlo method.

**Key words:** Monte Carlo method, activity, Romashka reactor, aluminum-26.

## Введение

Часто помимо типовых задач перед исследователями встают проблемы, решение которых стандартными методами является труднореализуемым. Причиной тому могут быть как геометрические (сложная форма источника), так и физические (слишком высокая или низкая активность, суммирование гамма-квантов в детекторе из-за специфики механизма распада) особенности образцов.

Один из возможных выходов из этой ситуации заключается в использовании метода Монте-Карло для получения недостающей информации из численного эксперимента. Однако в расчетах необходимо учитывать различия между реальным экспериментом и численной моделью.

Ниже приведено использование предложенного метода на примере решения двух нестандартных спектрометрических задач.

### Первая задача

Первая задача заключалась в определении массы выгоревшего топлива в ТВС реактора-преобразователя «Ромашка» [1]. Реактор представлял собой установку размером 641x1250 мм, где реактор и система преобразования были совмещены в единый блок. Передача тепла от реактора к преобразователю осуществлялась напрямую, без использования теплоносителя и системы для его циркуляции. Реактор был запущен 14 августа 1964 и, проработав в непрерывном режиме 625 суток, был остановлен.

В работе «Ромашки» использовались 11 ТВС, состоящих из тепловыделяющих пластин из дикарида урана, обогащенного U-235 до 90 %, и графитовой кассеты  $\varnothing 249$  мм с крышкой (рис. 1). Средняя масса урана-235 в одной ТВС составляла 4460,4 г. С 1966 года по 2021 ТВС находились на выдержке. Все 11 ТВС хранились в одинаковых по габаритам контейнерах.

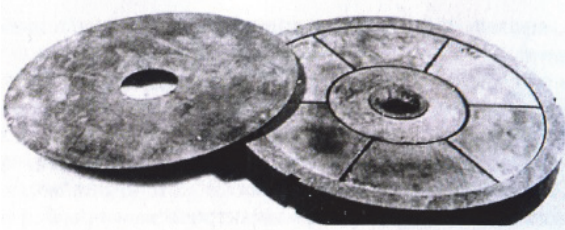


Рис. 1. ТВС реактора со снятой крышкой

На рис. 1 хорошо видны тепловыделяющие пластины в форме сегментов и кольца.

По тепловым характеристикам реактора было возможно определить среднее по всем ТВС значение выгоревшего топлива.

$$m_{b-ур} = \frac{AT_0W}{11\varepsilon_f N_A} = 2,48\text{г}, \quad (1)$$

где  $A$  – атомная масса  $U^{235}$ ,  $T_0$  – время работы реактора,  $W$  – мощность реактора,  $\varepsilon_f$  – энергия, выделяемая при делении одного ядра урана-235 [2],  $N_A$  – число Авогадро.

Поэтому был предложен способ, заключающийся в определении активности оставшегося в топливе цезия-137, являющегося дочерним ядром  $U^{235}$ , радиометрическим методом [3, 4]. Активность  $Cs^{137}$  определялась по скорости счета в пике полного поглощения (ППП) 662 кэВ, исходя из соотношения:

$$n_{Cs} = C_k A_{Cs}, \quad (2)$$

где  $C_k$  – коэффициент пропорциональности между активностью цезия-137 и скоростью счета в ППП 662 кэВ.

Масса выгоревшего топлива для каждой ТВС определялась следующим выражением:

$$m_{b-ур} = \frac{n_{Cs} T_0 e^{\lambda(t_c + T_0)} M_{235}}{C_k Y N_A (e^{\lambda T_0} - 1)}, \quad (3)$$

где  $t_c$  – время выдержки топлива после остановки реактора,  $M_{235}$  – молярная масса урана-235,  $Y$  – выход цезия-137 на деление одного ядра урана-235.

Измерение излучения проводилось полупроводниковым детектором CdZnTe  $10 \times 10 \times 5$  мм. На рис. 2 приведена схема выполнения измерений.

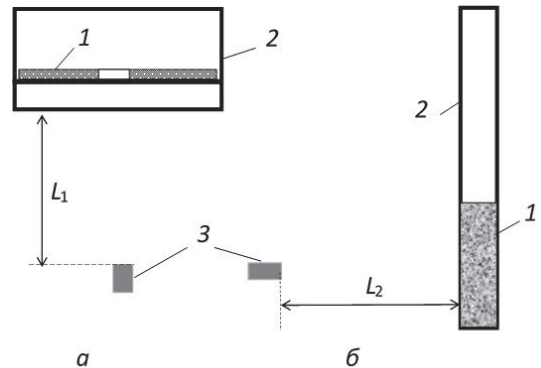


Рис. 2. Схема измерения спектра излучения: а – ТВС в контейнере, б – топлива в пенале: 1 – кассета с топливом, 2 – контейнер для хранения, 3 – детектор

Расстояние между детектором и образцом с топливом на рис.2, а –  $L_1 = 150$  см, на рис.2, б –  $L_2 = 400$  см.

После регистрации спектра излучения содержимое контейнеров дробилось на части и пересыпалось в пеналы транспортно-упаковочного комплекса (ТУК), представляющие собой стальной цилиндр  $\varnothing 260 \times 1245$  мм и толщиной стенок 3 мм.

Также для дополнительного контроля измерялся спектр топлива в ТУК.

Перед использованием выражения (3) было необходимо определить калибровочный коэффициент  $C_k$ . В силу сложной геометрии источников и их

высокой активности, вместо реального эксперимента с эталонным источником проводился численный – с помощью программы MCNP4. Значение калибровочного коэффициента определялось как скорость счета в ППП гамма-квантов с энергией 662 кэВ от источника единичной активности, соответствующего по форме контейнеру ТВС и пеналу (см. рис. 2). Плотность образца в случае контейнера оценивалась по массовым характеристикам ТВС, для ТУК – путем определения массы и объема его заполненной части.

Между реальным и модельным экспериментом всегда существуют несоответствия (например, отсутствие полной информации о детекторе: характеристики кристалла, наличие мертвых зон чувствительности в нем и др.), из-за этого было необходимо определить коэффициент коррекции для их учета.

Для этого было проведено несколько вспомогательных реальных и расчетных экспериментов. Измерялся реальный спектр излучения образцового спектрометрического гамма-источника (ОСГИ) Cs<sup>137</sup> на расстоянии 10 см и 30 см от детектора. Затем проводился численный эксперимент в MCNP4 в аналогичной геометрии, определялась скорость счета в ППП 662 кэВ.

Коэффициент коррекции вычислялся как отношение скоростей счета в основном пике цезия-137, полученных в реальном и численном эксперименте в соответствующей геометрии. Затем он умножался на вычисленный ранее коэффициент C<sub>k</sub>. Введение коэффициента коррекции было необходимо, так как значение реального и модельного C<sub>k</sub> отличалось в среднем на 15 %.

Для измерения были выбраны 4 ТВС с номерами 2, 7, 9, 11. Контейнер с ТВС № 2 был перегружен до начала измерений, поэтому регистрировался спектр только трех контейнеров с ТВС 7, 9, 11 и четырех пеналов ТУК 2, 7, 9, 11.

Скорость счета в ППП 662 кэВ ТВС в контейнерах составила 1500–2000 с<sup>-1</sup>, в пеналах – 130–220 с<sup>-1</sup>. На основании этих данных по формуле (3) была определена масса выгоревшего топлива для двух вариантов геометрии с погрешностью менее 7 % (см. табл. 1).

Таблица 1

Оценка массы выгоревшего топлива по данным измерения скорости счета ППП цезия-137, г

Номер ТВС	Контейнер	Пенал ТУК
2	–	1,60 ± 0,12
7	2,93 ± 0,15	3,11 ± 0,16
9	2,17 ± 0,11	2,47 ± 0,13
11	2,25 ± 0,12	1,84 ± 0,10

Из полученных данных видно, что средняя масса выгоревшего топлива составила 2,45 г, что совпадает со средним значением 2,48 г, рассчитанным по тепловым характеристикам реактора

Во второй задаче было необходимо определить активность образца с изотопом Al-26. Образец представлял собой герметичную ампулу с водным раствором алюминия-26.

Алюминий-26 является самым долгоживущим (период полураспада 7,17×10<sup>5</sup> лет) нестабильным изотопом алюминия и относится к группе исчезающих (космогенных) радионуклидов, то есть образовавшихся в период формирования нашей Солнечной системы (около 4,56 млрд лет назад), но в силу своего относительно малого периода полураспада уже не регистрирующихся в естественных условиях [5, 6]. Тем не менее исчезающие радионуклиды могут накапливаться в недрах звезд, на Земле [7, 8] и ряде других небесных тел [9, 10]. Также возможно их искусственное получение в ядерно-технических установках. Так алюминий-26 может быть получен в следующих реакциях:

1. Облучении Al<sup>27</sup>, быстрыми нейтронами: Al<sup>27</sup> (n, 2n) Al<sup>26</sup> [11].

2. Облучение Al<sup>27</sup> протонами посредством одноступенчатой реакции: Al<sup>27</sup> (p, pn) Al<sup>26</sup> и двуступенчатой – с образованием промежуточного ядра: Al<sup>27</sup> (p, 2n) Si<sup>26</sup>  $\xrightarrow{\beta^+}$  Al<sup>26</sup> [12].

3. Облучение магния дейтерием: Mg<sup>26</sup> (d, n) Al<sup>26</sup>, Mg<sup>26</sup> (d, 2n) Al<sup>26</sup> [12].

4. Взаимодействия магния с тритием: Mg<sup>24</sup> (t, n) Al<sup>26</sup> [13].

Al<sup>26</sup> нашел применение в радиоизотопной датировке астероидов и комет [10].

Изотоп Al<sup>26</sup> распадается посредством конкурирующих между собой процессов позитронного распада и захвата электрона.

В первом случае образуется позитрон, электронное нейтрино и ядро Mg<sup>26</sup><sub>12</sub>, которое переходит в основное состояние испусканием гамма-кванта по одному из трех возможных каналов: один квант 1808,7 кэВ (97,24 %), два кванта 1129,7 кэВ и 1808,7 кэВ (2,74 %) или один с энергией 2938,4 кэВ (0,02 %). Образовавшийся при распаде позитрон термализуется и аннигилирует с одним из электронов. В результате этого образуется пара гамма-квантов с равными энергиями 511 кэВ.

В случае электронного захвата ядро забирает электрон с внутренней оболочки, превращаясь в Mg<sup>26</sup>. Переход ядра магния-26 в основное состояние осуществляется аналогичным образом.

Очевидно, что при спектрометрических исследованиях низкоактивных изотопов, к которым относится и наш образец, целесообразно помещать их в непосредственной близости к детектору, повышая эффективность регистрации излучения. Однако в этом случае возникают эффекты, искажающие

Значения скоростей счета в пике 511 кэВ натрия-22 и алюминия-26 на разном расстоянии от детектора

Расстояние детектор-источник	Na <sup>22</sup> , 511 кэВ	Al <sup>26</sup> , 511 кэВ
0,7 см	2813 с <sup>-1</sup>	17,2 с <sup>-1</sup>
11,7 см	273 с <sup>-1</sup>	1,5 с <sup>-1</sup>
25 см	52,7 с <sup>-1</sup>	–

спектр. Например, суммирования каскадных и аннигиляционных квантов. Данный эффект происходит из-за малости временного промежутка между аннигиляцией позитрона с испусканием пары квантов 511 кэВ и излучением гамма-кванта дочерним ядром. Кроме того, такое наложение может произойти с каскадными гамма-квантами с энергиями 1129,7 и 1808,7 кэВ. Чтобы исключить влияние данных эффектов обычно увеличивают расстояние между детектором и источником. Тогда вероятность одновременной регистрации двух квантов существенно уменьшается. Но такой подход применим только для образцов с достаточно высокой активностью.

Дополнительно к этому алюминий-26 крайне редок, как и его эталонные источники, поэтому применение стандартного спектрометрического метода является затруднительным. Вследствие этого был предложен альтернативный подход с использованием ОСГИ источника Na<sup>22</sup> по причине идентичности механизмов распада.

На рис. 3 приведен типичный спектр от источника с Al<sup>26</sup>, расположенного вплотную к детектору. Представленный спектр отображает все характерные особенности его формирования, а также упомянутые выше эффекты.

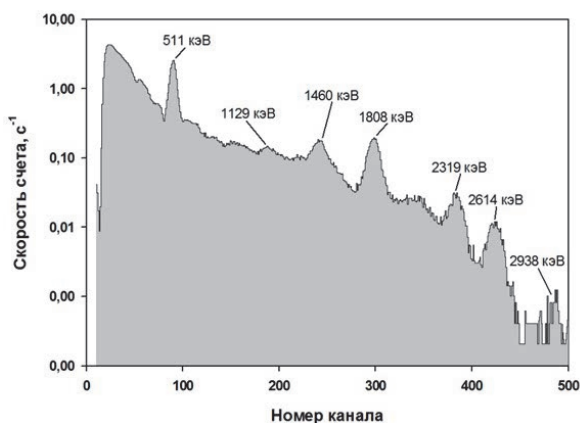


Рис. 3. Экспериментальный полный спектр Al<sup>26</sup>, полученный детектором NaI 50x50 мм

На рис. 3 наблюдается область полного пика поглощения – 1129кэВ. Помимо пиков от алюминия на рис. 3, наблюдаются линии от аннигиляции электрон-позитронных пар (511 кэВ), калия-40 (1460 кэВ) и таллия-208 (2614 кэВ).

Исследуемый образец представлял собой ампулу цилиндрической формы  $\varnothing 10 \times 5$  мм с жидким раствором алюминия-26.

Измерение спектра осуществлялось с помощью детектора БДЭГ-50(50)Н (50x50) мм [14].

Была проведена серия измерений с исследуемым образцом и ОСГИ источником Na-22 на расстоянии 0,5; 11,7; 25 см [15]. Результаты измерений приведены в табл. 2. Скорость счета для алюминия-26 на расстоянии 25 см от детектора получить не удалось из-за низкой активности образца.

Активность образца определялась тремя способами с использованием скоростей счета для энергетической линии 511 кэВ.

В первом способе учитывались данные скоростей счета линии 511 кэВ обоих источников, расположенных на расстоянии 25 см. На таком расстоянии эффекты суммирования квантов не проявляются, а источники можно считать точечными.

Калибровочный коэффициент для Na-22 на расстоянии 25 см определялся через скорость счета в ППП по линии 511 кэВ в пересчете на единичную активность источника. Используемый ОСГИ источник Na-22 на момент измерения имел активность  $A^{Na} = 24,4$  кБк, поэтому:  $C_{calibr}^{Na}(25) = n^{Na}(25)/A^{Na} = 2,16 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

На основе полученного  $C_{calibr}^{Na}(25)$  определялся калибровочный коэффициент для алюминия-26  $C_{calibr}^{Al}(25)$ . Ввиду схожести механизмов распадов для этого было достаточно учесть разницу в выходах позитронов:

$$C_{calibr}^{Al}(25) = C_{calibr}^{Na}(25) \frac{v^{Al}}{v^{Na}} = 2,16 \cdot 10^{-3} \frac{163,5}{179,9} = 1,95 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1},$$

где  $C_{calibr}^{Al}(25)$  – калибровочный коэффициент на расстоянии 25 см для Al<sup>26</sup>,  $v^{Al}$ ,  $v^{Na}$  – выходы позитрона при  $\beta^+$ -распаде Al<sup>26</sup> и Na<sup>22</sup> соответственно.

Ввиду отсутствия необходимых экспериментальных данных скорость счета на 25 см для Al-26 оценивалась через аналогичное значение для 11,7 см. При этом учитывалось, что скорость счета для точечного источника убывает обратно пропорционально квадрату расстояния:

$$n^{Al}(25) = n^{Al}(11,7) \left( \frac{11,7}{25} \right)^2 = 0,32 \text{ с}^{-1},$$

здесь  $n^{Al}(25)$ ,  $n^{Al}(11,7)$  – скорости счета в пике 511 кэВ Al<sup>26</sup> на расстоянии 25 см и 11,7 см соответственно.

Активность исследуемого образца получилась равной:

$$A_{Al} = \frac{n^{Al}(25)}{C_{calibr}^{Al}(25)} = 167,6 \text{ Бк.}$$

С учетом неопределенности измерения:

$$A_{Al} = 168 \pm 5 \text{ Бк.} \quad (4)$$

Второй способ был аналогичен первому с той лишь разницей, что использовались значения скорости счета на расстоянии 11,7 см от детектора.

Калибровочный коэффициент  $Na^{22}$  для 11,7 см:

$$C_{calibr}^{Na}(11,7) = n^{Na}(11,7) / A^{Na} = 1,12 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}.$$

Калибровочный коэффициент для  $Al^{26}$  в аналогичной геометрии получился равным:

$$C_{calibr}^{Al}(11,7) = C_{calibr}^{Na}(11,7) \frac{v^{Al}}{v^{Na}} = 1,02 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}.$$

Активность образца:

$$A_{Al} = \frac{n^{Al}(11,7)}{C_{calibr}^{Al}(11,7)} = 147,6 \text{ Бк.}$$

С учетом неопределенности измерения окончательный результат:

$$A_{Al} = 148 \pm 5 \text{ Бк.} \quad (5)$$

В третьем способе использовались экспериментальные данные для случая расположения источника на расстоянии 0,7 см от детектора.

Калибровочный коэффициент  $Na^{22}$  на расстоянии 0,7 см от детектора:

$$C_{calibr}^{Na}(0,7) = n^{Na}(0,7) / A^{Na} = 0,115 \text{ с}^{-1}.$$

Калибровочный коэффициент для  $Al^{26}$  с учетом разных выходов позитронов:

$$C_{calibr}^{Al}(0,7) = C_{calibr}^{Na}(0,7) \frac{v^{Al}}{v^{Na}} = 0,1045 \text{ с}^{-1}.$$

Тогда активность образца без учета эффектов суммирования:

$$A_{Al} = \frac{n^{Al}(0,7)}{C_{calibr}^{Al}(0,7)} = 164,6 \text{ Бк.}$$

Учет влияния эффекта суммирования квантов осуществлялся следующим образом. Предположим, у нас имеется спектр от точечного источника  $Na^{22}$  единичной активности. Тогда скорость счета в пике 511 кэВ будет равна вероятности гамма-кванту быть зарегистрированным в каналах, соответствующих линии 511 кэВ. Обозначим эту вероятность  $P_1$ . Интеграл по всему спектру кроме пика 511 кэВ даст вероятность  $P_2$  регистрации всех остальных фотонов. Эти

два события являются независимыми. Поэтому вероятность одновременной регистрации квантов от распада натрия и аннигиляции пары  $\tilde{P}$  (то есть их наложения) будет равна произведению вероятностей  $P_1$  и  $P_2$ . Соответственно  $1 - \tilde{P}$  – вероятность избежать наложения.

Для оценки этих вероятностей было проведено моделирование с использованием программы MCNP4. По результатам которого были получены две пары спектров: для  $Al^{26}$  и  $Na^{22}$ . Интегралы по этим спектрам определяют соответствующие вероятности для каждого изотопа (см. табл. 3).

Таблица 3

Значения вероятностей  $P_1$ ,  $P_2$  и  $1 - \tilde{P}$  для натрия-22 и алюминия-26, полученные с помощью численного моделирования в MCNP4

	Na-22	Al-26
$P_1$	0,28	0,34
$P_2$	0,31	0,36
$1 - \tilde{P}$	0,91	0,88

На основе этих вероятностей было получено скорректированное значение активности образца:

$$\widetilde{A}_{Al} = A_{Al} \frac{1 - \widetilde{P}_{Al}}{1 - \widetilde{P}_{Na}} = 159,0 \text{ Бк.}$$

Также было необходимо учесть различия в геометрической форме источников: ампула с  $Al^{26}$  имела форму цилиндра,  $Na^{22}$  – точечного источника. Для этого был введен геометрический коэффициент коррекции, который также определялся с помощью MCNP4. Для этой цели проводилось два численных эксперимента на расстоянии 0,7 см от детектора. В первом использовался точечный источник, во втором – цилиндрической формы. Результаты моделирования приведены в табл. 4.

Таблица 4

Скорости счета для источника  $Na^{22}$  точечной и цилиндрической формы

	$Na^{22}$ , 511 кэВ	
Форма источника	точечный	цилиндрический
Скорость счета ППП	0,2651	0,2223

Геометрический коэффициент коррекции определялся как отношение скоростей счета для источников разной формы:

$$C_{geo} = \frac{0,2223}{0,2651} = 0,8385.$$

С учетом всех коэффициентов, а также неопределенности измерений активность образца получилась равной:

$$A_{Al} = 190 \pm 6 \text{ Бк.} \quad (6)$$

Среднее значение активности, полученной по трем способам обработки результатов (4–6), вычисляют методом весовой функции по формуле [15]:

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^3 A_i w_i}{\sum_{i=1}^3 w_i},$$

где  $A_i$  – значение активности, рассчитанное по  $i$ -ому способу, а  $w_i$  – соответствующий весовой множитель для этого способа. Весовой множитель определяется неопределенностью результата измерения в соответствие с выражением  $w_i = 1/(\Delta A_i)^2$ .

Окончательный результат:

$$\bar{A}_{Al} = 166 \pm 3 \text{ Бк,}$$

вычисление абсолютной неопределенности определения активности радионуклида производилось по формуле:

$$\Delta A = \left( \sum_{i=1}^3 w_i \right)^{-0,5}.$$

### Выводы

Был предложен метод решения нестандартных задач определения активности исследуемых образцов, основанный на применении численного метода Монте-Карло вместе со стандартным спектрометрическим методом.

Таким образом были решены две нестандартные спектрометрические задачи, для которых применение стандартных методов являлось затруднительным.

Применение предложенного метода в первой задаче позволило определить количество выгоревшего топлива в ТВС реактора «Ромашка» методом неразрушающего анализа.

Необходимые калибровочные коэффициенты определялись исходя из численного эксперимента, позволившего обойти ограничение, вызванное сложной формой контейнера с ТВС и его высокой активностью.

Среднее значение массы выгоревшего топлива составило 2,45 г, что с достаточной точностью совпадает со значением 2,48 г, полученным из расчета по тепловым характеристикам реактора.

Во второй задаче с помощью предложенного метода была определена активность ампулы с водным раствором  $Al^{26}$ . Применение предложенного метода позволило определить искомые калибровочные коэффициенты, устранив ограничения, вызванные, низкой активностью образца и крайней редкостью изотопа  $Al^{26}$ .

Активность определялась тремя способами, имеющими свои особенности. Рассматривалась линия с энергией 511 кэВ, учитывались различные физические и геометрические эффекты, оказывающие влияние на результат. В расчетах использовалась программа MCNP4, реализующая метод Монте-Карло.

Полученные значения активности составили  $168 \pm 5$  Бк,  $148 \pm 5$  Бк и  $190 \pm 6$  Бк. Результат, усредненный методом весовых коэффициентов, составил  $166 \pm 3$  Бк.

Следует отметить, что комбинирование всех трех способов позволило получить результат с хорошей точностью.

### Список литературы

1. Кухаркин Н. Е., Кулыгин В. М., Павшук В. А. Курчатовский институт воздушно-космическому флоту страны. Опередившие время. М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2018.
2. Горбачев В. М., Замятнин Ю. С., Лбов А. А. Взаимодействие излучений с ядрами тяжелых элементов и деление ядер: Справ. М.: Атомиздат, 1976.
3. Райлли Д., Энслин Н., Смит Х. мл., Крайнер С. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов. М., БИНОМ, 2000.
4. Потапов В. Н., Волкович А. Г, Симицкий Ю. Н. Спектрометрический способ оценки характеристик отработавшего ядерного топлива // Атомная энергия. 2009. Т. 106. Вып. 5, С. 273–277.
5. Greenwood N. N., Earnshaw A. Chemistry of the Elements (2nd ed.) Butterworth-Heinemann, 1997.
6. De Pater I, Lissauer J. J. Planetary Sciences (Updated 2nd ed.). Cambridge, University Press, 2015.
7. El Eid M. F., Meyer B. S., The L.S. Evolution of Massive Stars Up to the End of Central Oxygen Burning // ApJ The Astrophysical Journal. 2004, N 611.1. P. 452–465.
8. Moskovitz N., Gaidos E. Differentiation of planetesimals and the thermal consequences of melt migration // Meteoritics & Planetary Science. 2011. N 46(6). P. 903–918.
9. Overholt A. C., Melotta A. L. Cosmogenic nuclide enhancement via deposition from long-period comets as a test of the Younger Dryas impact hypothesis // Earth and Planetary Science Letters. 2013. Vol. 377–378. P. 55–61.
10. Evans J. C., Rancitelli L. A., Reeves J. H. Al-26 content of Antarctic meteorites: Implications for terrestrial ages and bombardment history // Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 10th. 1979. P. 1061–1072.

11. Васильев С. С., Михалева Т. Н., Руденко Н. П., Севастьянов А. И., Зазулин В. С. Долгоживущий изотоп Al-26 в конструкционном алюминии ядерного реактора // Атомная энергия. 1961. Т. 11. Вып. 4. С. 401–403.

12. Краснов Н. Н., Дмитриев П. П., Севастьянов Ю. Г., Безматерных А.С. Получение Al-26 при облучении магния дейтонами с энергией 20 МэВ // Атомная энергия. 1965. Т. 19. Вып. 1. С. 62–63.

13. Руденко Н. П., Севастьянов А. М. О некоторых возможных методах получения радиоактивных

изотопов // Атомная энергия. 1965. Т. 18. Вып. 6. С. 649–650.

14. Грин Стар Группа предприятий [Электронный ресурс]: Блоки детектирования БДЭГ [веб-сайт] – 2018. – URL: <http://www.greenstar.ru/bdeg.html> (дата обращения 25.08.2021).

15. Даниленко В. Н. [и др.] Активность радионуклидов в объемных образцах: методические рекомендации по выполнению измерений на сцинтилляционном гамма-спектрометре М: ВНИИФТРИ, 1995.