

УДК 539.125.5:539.12:621.039.556:543.522

ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ W–Be ФОТОНЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА

© 2021 г. А. А. Афонин¹, *, Ю. М. Бурмистров¹, С. В. Зуев¹,
Е. С. Конобеевский¹, М. В. Мордовской¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: afonin@inr.ru

Поступила в редакцию 24.05.2021 г.

После доработки 01.06.2021 г.

Принята к публикации 28.06.2021 г.

Рассмотрена возможность восстановления спектра нейтронов фотонейтронного источника с использованием активационных детекторов. Проведен выбор активирующих реакций пригодных для восстановления нейтронных спектров. Восстановление проводилось с использованием программы LOUNI из банка программ Агентства по атомной энергии (OECD NEA). Подбор оптимальных весовых параметров членов в минимизируемом функционале проводился по данным, полученным с использованием модельного спектра нейтронов.

DOI: 10.31857/S0367676521100057

ВВЕДЕНИЕ

Созданный на базе линейного ускорителя электронов W–Be-фотонейтронный источник нейтронов [1] позволяет проводить облучение различных образцов во внутренней полости источника при плотности потока тепловых нейтронов 10^7 – 10^8 см⁻² · с⁻¹. Ранее в работе [2] нами была описана методика проведения измерений и изложено описание метода нейтронно-активационного анализа. Также в работе [2] описан метод обработки полученных экспериментальных данных и авторская методика восстановления спектра. Целью настоящей работы является исследование полученных экспериментальных данных независимым программным продуктом LOUNI из банка программ OECD Nuclear Energy Agency (OECD NEA) [3].

НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

Для определения плотности потока нейтронов использовался метод нейтронно-активационного анализа (НАА) [4]. Измерения плотности потока тепловых нейтронов внутри и вне источника проводились методом НАА с использованием активационных детекторов из материалов с известными сечениями активации (n , γ)-реакций. Все измерения основаны на определении активности, наведенной нейтронами в веществе детектора. Подробно метод описан в [2, 5]. Кратко отме-

тим, что в рамках НАА измеряемая площадь аналитического пика радионуклида в гамма-спектре i -го активированного детектора представляется в виде:

$$S_i = \frac{m_i g_i N_A p_i \varepsilon}{A_i \lambda_i} K_i J_i, \quad (1)$$

где S_i – число отсчетов в аналитическом пике изотопа i -го элемента (без фона); m_i – масса i -го элемента в детекторе; g_i – содержание аналитического изотопа i -го элемента в естественной смеси изотопов; N_A – число Авогадро; p_i – выход гамма-квантов на один распад образовавшегося радиоактивного изотопа; ε – эффективность регистрации излучения наведенной активности; A_i – атомный вес i -го элемента; λ – постоянная радиоактивного распада;

$$K_i = (1 - e^{-\lambda t_a}) e^{-\lambda t_b} (1 - e^{-\lambda t_n}) \quad (2)$$

и t_a – время активации; t_b – время выдержки после облучения; t_n – время измерения.

В формуле (1) J_i – скорость i -ой реакции или интеграл свертки, который представляют в виде суммы свертки по m энергетическим точкам спектра:

$$J_i = \int_0^{\infty} \sigma_i(E) \varphi(E) dE \rightarrow \sum_{j=0}^m \sigma_i(E_j) \Phi(E_j), \quad (3)$$

$\sigma_i(E)$ – сечение активирующей ядерной реакции в зависимости от энергии нейтронов E ; $\varphi(E)$ –

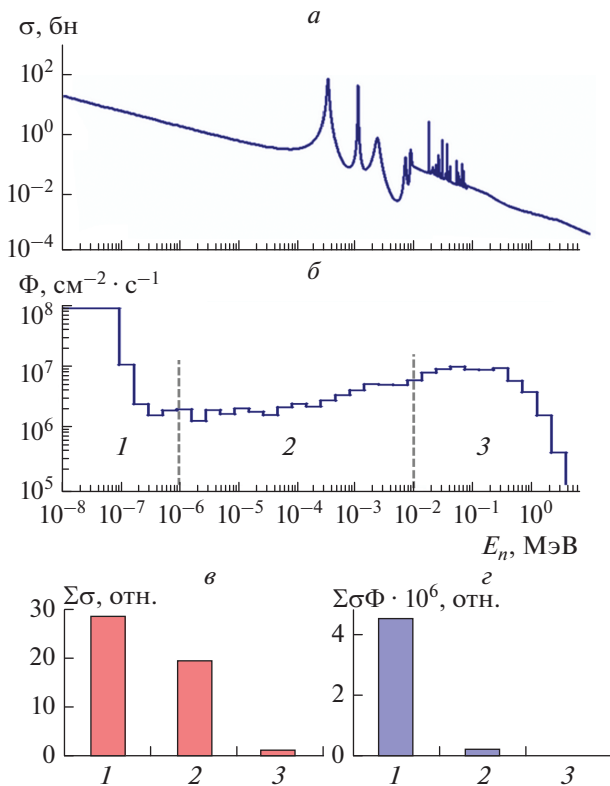


Рис. 1. Энергетическая зависимость сечения реакции захвата $^{55}\text{Mn}(n, \gamma)^{56}\text{Mn}$ [6] (а); модельный энергетический спектр (плотность потока Φ) нейтронов [7] внутри фотонейтронного источника и разбивка его на три области: область тепловых (1), промежуточных (2) и быстрых нейтронов (3) (б); суммы сечения (в) и интегралы свертки (г) для областей 1–3 спектра на рис. 1б.

спектральная плотность потока нейтронов и $\Phi(E)$ – плотность потока нейтронов.

Суммарный интеграл свертки (3) по всем аналитическим реакциям детекторов в программе LOUNI представляется в виде функционала для минимизации:

$$Q = Q_0 + \gamma \sum_{k=1}^5 W_k Q_k. \quad (4)$$

Здесь члены Q_k имеют различные физические смыслы и позволяют использовать различные подходы к восстановлению спектров. В данной работе мы использовали некоторые из них: Q_0 – взвешенную квадратную сумму разностей измеренных и рассчитанных решений, т.е. это фактически стандартный χ^2 , Q_3 – взвешенную сумму квадратов первых производных решения и Q_4 – взвешенную сумму квадратов вторых производных решения.

Весовые коэффициенты γ и W_k позволяют задавать дополнительный вклад различных членов в общую сумму для минимизации. Подробное описание используемого математического аппарата представлено в описании программы [3].

При выборе активационного детектора мы воспользовались методикой, изложенной нами в работе [5]. Она заключается в том, что для НАА используются детекторы, имеющие избирательную чувствительность к нейтронам различных энергий с учетом характерных особенностей исследуемого спектра.

На рис. 1 показано: энергетическая зависимость сечения реакции захвата (n, γ) на ядре ^{55}Mn [6] (рис. 1а) и модельный энергетический спектр нейтронов (рис. 1б), полученный в результате моделирования источника [7]. Спектр на рис. 1б можно условно разбить на три области: 1 – “тепловых” (10^{-2} –1 эВ), 2 – “промежуточных” (1 эВ–10 кэВ) и 3 – “быстрых” (более 10 кэВ) нейтронов. Здесь обозначение областей условное. Видно, что и сечение, и спектр имеют характерные особенности в разных участках энергетической зависимости. На рис. 1 также показаны суммы сечения (рис. 1в) и свертки (3) (рис. 1г) для областей 1–3 спектра на рис. 1б. Для ^{55}Mn видно, что, хотя вклады в сечение тепловой и промежуточных частей спектра существенны, но в сумму свертки дает вклад только тепловая область.

Анализ для реакций захвата на разных ядрах показал, что можно подобрать ряд элементов для использования в качестве материалов активационных детекторов, которые будут чувствительны в основном к нейтронам из тепловой области.

Поскольку нас интересует именно тепловая и промежуточная области спектра и плотность потока тепловых нейтронов, то для удобства проведения измерений в качестве материалов активационных детекторов выбраны элементы Ag, Mg, Mn, Sb, Ti, As, Ga из-за достаточных больших значений сечения активации и удобного для измерений периода полураспада. На рис. 2 показаны суммы свертки (3) для областей 1–3 спектра на рис. 1б. Для ^{26}Mg , ^{55}Mn , ^{50}Ti , ^{107}Ag видно, что в измеряемую сумму свертки (3) дает вклад только тепловая область спектра нейтронов, а для ^{69}Ga , ^{71}Ga , ^{75}As и ^{121}Sb сумма свертки чувствительна также и к промежуточной части спектра. Следует отметить также слабую чувствительность измеряемых данных для этих изотопов к нейтронам из “быстрой” части спектра. Измеренные данные J_i для указанных 8 образцов использовались далее в программе LOUNI при восстановлении спектра нейтронов.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СПЕКТРА ПРОГРАММОЙ LOUNI

Как было сказано выше, функционал для минимизации в программе представлен в виде (4). Свободными параметрами при восстановлении являются весовые параметры γ перед Q_k при минимизации функционала Q .

Для выбора оптимальных значений γ при восстановлении нами сначала использовались в качестве “измеренных” значений активностей детекторов на основе Ag, Mn, Ti, Mg, Sb, As и Ga значения, рассчитанные с использованием спектра, полученного в результате моделирования. Весовые параметры γ подбирались таким образом, чтобы получить восстановленный спектр наиболее близким к модельному и с наименьшими ошибками. Программа LOUNI позволяет использовать при восстановлении различные члены в минимизируемом функционале Q . Были рассмотрены варианты минимизации функционалов Q_0 (рис. 3), $Q_0 + Q_3$ (рис. 4) и $Q_0 + Q_4$. Результат восстановления модельного спектра при минимизации функционала $Q_0 + Q_4$ схож с результатами минимизации $Q_0 + Q_3$ (рис. 4). При этом рассматривалось также влияние количества экспериментальных величин (числа используемых детекторов) на качество восстановления. На рис. 3–4 приведены результаты восстановления модельного спектра с использованием от 5 (Ag, Mn, Mg, Ti, Sb) до всех 8 (Ag, Mn, Mg, Ti, Sb, As, ^{69}Ga , ^{71}Ga) детекторов. Полученные результаты показывают хорошее воспроизведение модельного спектра в области чувствительности до 3 кэВ и уменьшение коридора ошибок и осцилляций в решении при увеличении числа детекторов. Минимизация также вкладов от первых (Q_3) или вторых производных (Q_4) приводит к сглаживанию и уменьшению осцилляций восстановленного спектра, а также к сужению коридора ошибок. Аналогичное поведение наблюдается и при увеличении участвующих в восстановлении экспериментальных данных. Минимизация одного функционала Q_0 не обеспечивает получение результата с приемлемой гладкостью решения и коридором ошибок. При этом использование варианта минимизации $Q_0 + Q_3$ дает результат с меньшим числом осцилляций, а $Q_0 + Q_4$ обеспечивает более узкий коридор ошибок. Следует отметить, что для обеспечения удовлетворительного восстановления спектра в области чувствительности до 3 кэВ достаточно использовать до 7 детекторов.

К сожалению, программа LOUNI не обеспечивает в достаточной степени получение абсолютных значений получаемых плотностей потока тепловых нейтронов из-за используемых в качестве свободных параметров различных весовых

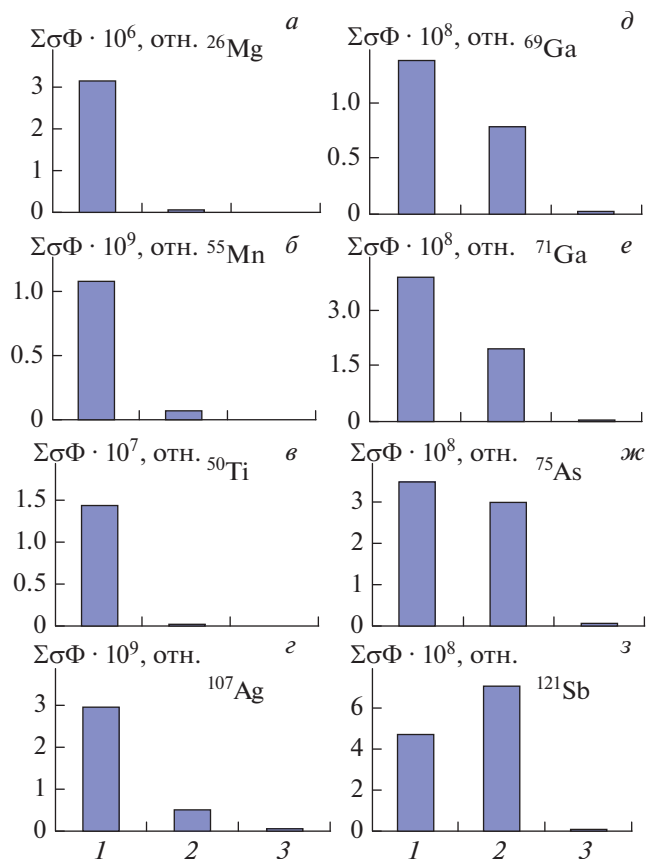


Рис. 2. Суммы свертки (3) для областей 1–3 спектра на рис. 1б: для реакции $^{26}\text{Mg}(n, \gamma)^{27}\text{Mg}$ (а), $^{55}\text{Mn}(n, \gamma)^{56}\text{Mn}$ (б), $^{50}\text{Ti}(n, \gamma)^{51}\text{Ti}$ (в), $^{107}\text{Ag}(n, \gamma)^{108}\text{Ag}$ (г), $^{69}\text{Ga}(n, \gamma)^{70}\text{Ga}$ (д), $^{71}\text{Ga}(n, \gamma)^{72}\text{Ga}$ (е), $^{75}\text{As}(n, \gamma)^{76}\text{As}$ (ж) и $^{121}\text{Sb}(n, \gamma)^{122}\text{Sb}$ (з).

факторов. При этом форма модельного спектра восстанавливается достаточно хорошо.

Полученные при восстановлении модельного спектра параметры γ использовались далее для восстановления спектра нейтронов по реальным экспериментальным данным. На рис. 5–6 приведены результаты восстановления экспериментального спектра с использованием, как различного числа экспериментальных данных (детекторов), так и различных вариантов функционалов минимизации при восстановлении спектра.

Полученные результаты также показывают уменьшение коридора ошибок в области чувствительности до 3 кэВ и числа осцилляций в решении при увеличении числа детекторов. Минимизация вкладов от первых (Q_3) или вторых производных (Q_4) также приводит к сглаживанию и уменьшению осцилляций восстановленного спектра и к сужению коридора ошибок. Аналогичное поведение наблюдается и при увеличении участвующих в восстановлении экспериментальных данных. Минимизация одного

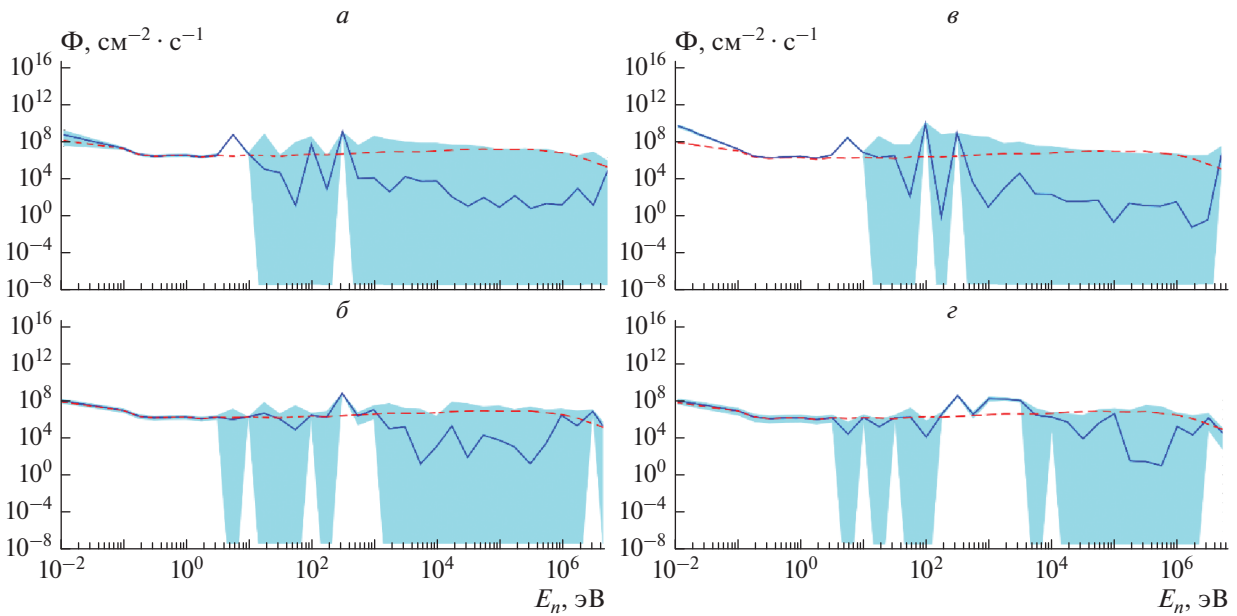


Рис. 3. Результат восстановления модельного спектра при минимизации функционала Q_0 при использовании: *a* – 5 (Ag, Mn, Mg, Ti, Sb), *б* – 6 (Ag, Mn, Mg, Ti, Sb, As), *в* – 7 (Ag, Mn, Mg, Ti, Sb, As, ^{69}Ga), *г* – 8 (Ag, Mn, Mg, Ti, Sb, As, ^{69}Ga , ^{71}Ga) детекторов. Штриховая линия – модельный спектр, сплошная – результат восстановления модельного спектра. Закрашенные области – коридор ошибок.

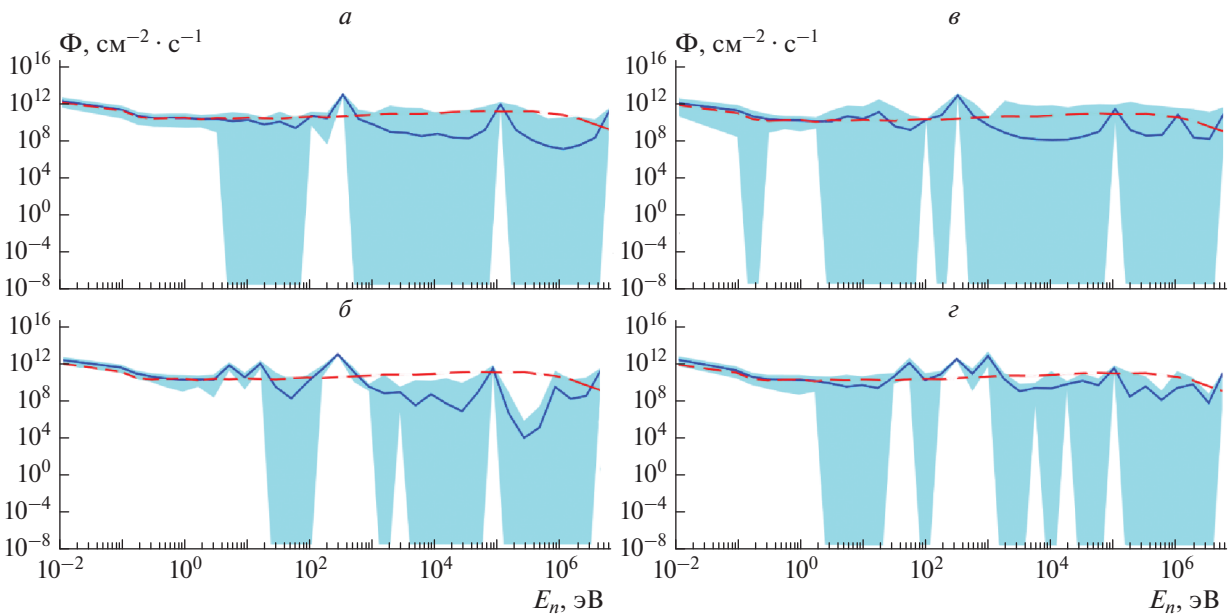


Рис. 4. Результат восстановления модельного спектра при минимизации функционала $Q_0 + Q_3$. Обозначения, как на рис. 3.

функционала Q_0 также не обеспечивает получение результата с приемлемой гладкостью решения и коридором ошибок. При этом использование варианта минимизации $Q_0 + Q_3$ также дает результат с меньшим числом осцилляций, а $Q_0 + Q_4$

обеспечивает более узкий коридор ошибок. Следует отметить, что для обеспечения удовлетворительного восстановления спектра в области чувствительности до 3 кэВ достаточно использовать 5–6 детекторов.

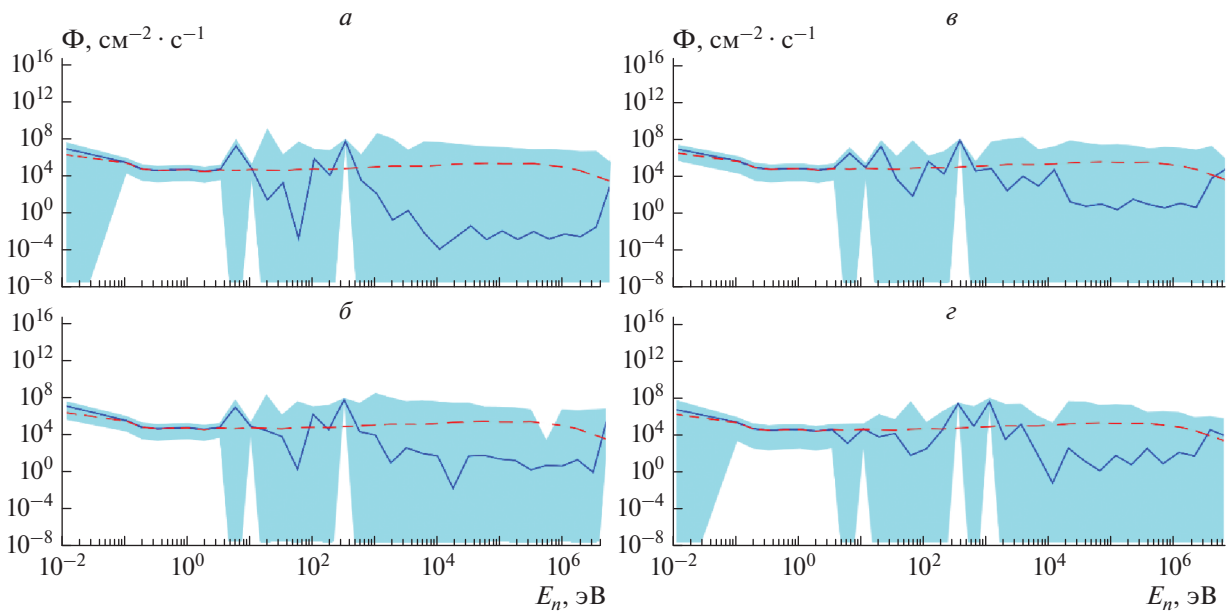


Рис. 5. Результат восстановления экспериментального спектра при минимизации функционала Q_0 . Обозначения, как на рис. 3. Сплошная линия – результат восстановления экспериментального спектра.

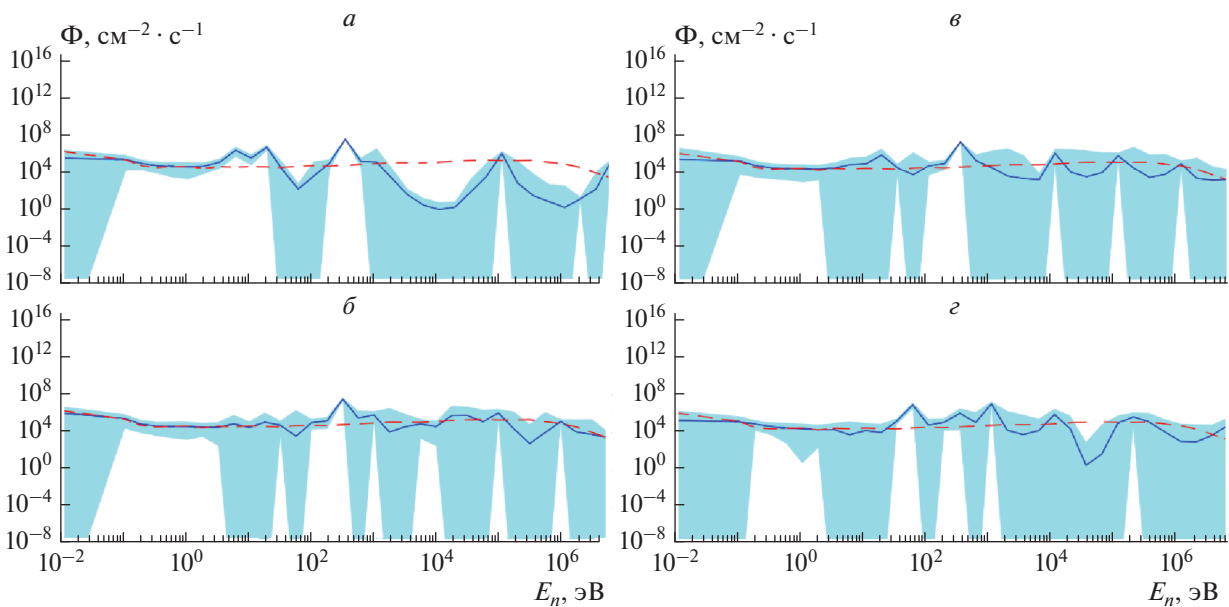


Рис. 6. Результат восстановления экспериментального спектра при минимизации функционала $Q_0 + Q_3$. Обозначения, как на рис. 3 и 5.

В целом программа LOUNI обеспечивает приемлемое качество и коридор ошибок восстановления формы спектра нейтронов фотонейтронного источника с использованием данных с активационных детекторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена возможность восстановления спектра нейтронов фотонейтронного источника с использованием активационных детекторов. Проведен отбор активирующих реакций пригодных для

восстановления нейтронных спектров. Восстановление проводилось с использованием программы LOUHI из банка программ Агентства по атомной энергии (OECD NEA). Подбор оптимальных весовых параметров членов в минимизируемом функционале проводился по данным, полученным с использованием модельного спектра нейтронов. Модельный спектр воспроизводится достаточно хорошо в области чувствительности реакций от 0.01 эВ до 3 кэВ. С увеличением количества данных, используемых при восстановлении, уменьшаются осцилляции спектра и сужается коридор ошибок в области энергий выше 3 кэВ. Восстановленный спектр по экспериментальным данным достаточно хорошо воспроизводит форму модельного спектра. С увеличением количества данных, используемых при восстановлении, также сужается коридор ошибок и уменьшаются осцилляции спектра в области энергий выше 3 кэВ. Показано, что минимизация одного функционала Q_0 , т.е. использование только минимизации χ^2 не обеспечивает получение результата с приемлемой гладкостью решения и коридором ошибок. Результат улучшается при дополнительной минимизации

взвешенной суммы квадратов первых или вторых производных от решения. При этом достигается меньшее число осцилляций и более узкий коридор ошибок в решении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев А.В., Бурмистров Ю.М., Зуев С.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 6. С. 824; Andreev A.V., Burmistrov Yu.M., Zuyev S.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 6. P. 748.
2. Афонин А.А., Зуев С.В., Конобеевский Е.С. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 6. С. 814; Afonin A.A., Zuyev S.V., Konobeevski E.S. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No. 6. P. 731.
3. <http://www.oecd-nea.org/tools/abstract/detail/nea-1026/>.
4. Гутько В.И. Активационный анализ. Минск: МГЭУ, 2008. 74 с.
5. Афонин А.А., Зуев С.В., Конобеевский Е.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 8. С. 1075; Afonin A.A., Zuyev S.V., Konobeevski E.S. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. P. 884.
6. <http://www-nds.iaea.org/ngatlas2/>.
7. Andreev A., Burmistrov Yu., Gromov A. et al. // Proc. of the NUFRA2015. (Kemer, 2015).

Studying the thermal neutron spectrum of the W–Be photoneutron source

A. A. Afonin^{a,*}, Yu. M. Burmistrov^a, S. V. Zuyev^a, E. S. Konobeevski^a, M. V. Mordovskoy^a

^aInstitute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia

*e-mail: afonin@inr.ru

The possibility of reconstructing the neutron spectrum of a photoneutron source using activation detectors is considered. The choice of activating reactions suitable for the reconstruction of neutron spectra was carried out. The reconstruction was carried out using the LOUHI program from the Nuclear Energy Agency (NEA) program bank. The selection of the optimal weight parameters of the terms in the minimized functional was carried out according to the data obtained using the model neutron spectrum.