

НОВАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИИ ОТКЛИКА АЛМАЗНОГО ДЕТЕКТОРА ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ДТ-НЕЙТРОНОВ

В. В. Гаганов^{1,}, И. С. Вершинин¹, А. В. Долгополов^{1,2},
Е. В. Рябева³, Р. Ф. Ибрагимов³*

¹ Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский
научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
Саров, 607188, Россия

² Филиал Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова
в Сарове, Саров, 607328, Россия

³ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, 115409, Россия

Выполнен эксперимент с одновременным облучением алмазного детектора ДТ-нейтронами и α -частицами. Результаты эксперимента указывают на различия в процессах сбора носителей заряда, возникающих в алмазном детекторе при регистрации α -частиц и ядер бериллия. Показано, что для описания функции отклика рассматриваемого детектора необходимо использовать трехкомпонентное представление.

An experiment with simultaneous irradiation of a diamond detector with DT neutrons and alpha particles was performed. The results of the experiment indicate differences in the processes of collecting charge carriers that occur in a diamond detector when registering alpha particles and beryllium nuclei. It is shown that a three-component representation must be used to describe the response function of the considered detector.

PACS: 29.40.Wk; 29.30.Hs

ВВЕДЕНИЕ

Детектор с алмазным чувствительным элементом (далее — алмазный детектор) является эффективным инструментом для измерения спектра ДТ-нейтронов с энергетическим разрешением менее 1% [1, 2]. Спектрометрические возможности алмазного детектора обусловлены наличием в его функции отклика обособленного пика, связанного с реакцией $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ (энергия реакции — 5,702 МэВ). α -частицы и ядра бериллия, образующиеся в этой реакции, полностью тормозятся в чувствительной области детектора; оставленная ими в алмазе энергия линейно связана с энергией налетающего нейтрона. Ближайший к обособленному пику элемент структуры функции отклика обусловлен реакцией $^{12}\text{C}(n, n')^3\alpha$

* E-mail: gaval@rambler.ru

(энергия реакции — 7,367 МэВ). Ширина промежутка между двумя элементами структуры, определяемая разностью значений энергии двух реакций, составляет 1,665 МэВ. Такой промежуток исключает взаимное наложение соответствующих элементов функции отклика и обеспечивает однозначную трактовку результатов измерений с алмазным детектором.

В настоящее время накоплен значительный объем данных, полученных с использованием алмазных детекторов в экспериментах на различных нейтронных генераторах [2, 3]. В нескольких экспериментальных исследованиях алмазных детекторов было отмечено отличие их функции отклика от предсказываемого теорией обособленного пика (на участке значений амплитуд импульсов, соответствующих реакции $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$). В измеренных распределениях амплитуд импульсов было выявлено наличие практически равномерного распределения со стороны малых амплитуд импульсов — континуума, связанного с вылетом заряженных частиц, образовавшихся в реакции, за пределы чувствительной области детектора [4, 5]. Расчетные оценки [4, 5] показывают, что более 95 % всех продуктов реакции $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ должны давать вклад в обособленный пик. Однако такие оценки не позволяют объяснить значительное число событий в континууме.

Кроме того, анализ распределений амплитуд импульсов с алмазного детектора, облучаемого ДТ-нейтронами, показал, что совместить результаты эксперимента и расчетного моделирования можно лишь на основе предположения, что функция отклика алмазного детектора, на участке амплитуд импульсов, соответствующих реакции $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$, помимо пика и континуума, включает дополнительный элемент структуры. В первом приближении этот элемент был описан широким гауссоподобным пиком. Лишь с использованием такой модели функции отклика удалось получить удовлетворительное воспроизведение экспериментальных распределений [6].

1. НОВЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ С АЛМАЗНЫМ ДЕТЕКТОРОМ

Для уточнения принципов работы алмазных детекторов специалистами РФЯЦ-ВНИИЭФ (Саров) и МИФИ (Москва) был выполнен новый эксперимент. Исследовался детектор ДБ-10 с чувствительным элементом из искусственного алмаза в виде пластины с размерами $2 \times 2 \times 0,3$ мм [2, 7]. При рабочем напряжении –150 В напряженность электрического поля в чувствительной области детектора составила 0,5 В/мкм. Детектор устанавливался на расстоянии 15 см от источника нейтронов, которым являлся генератор НГ-11И с ускоряющим напряжением 160 кВ [8]. Средний поток ДТ-нейтронов из мишени генератора составлял 10^{10} с^{-1} ; плотность потока нейтронов в месте установки детектора — $3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Непосредственно перед детектором, на расстоянии 0,4 см от его приемной поверхности, был закреплен эталонный источник α -излучения ^{226}Ra , испускающий α -частицы с энергиями

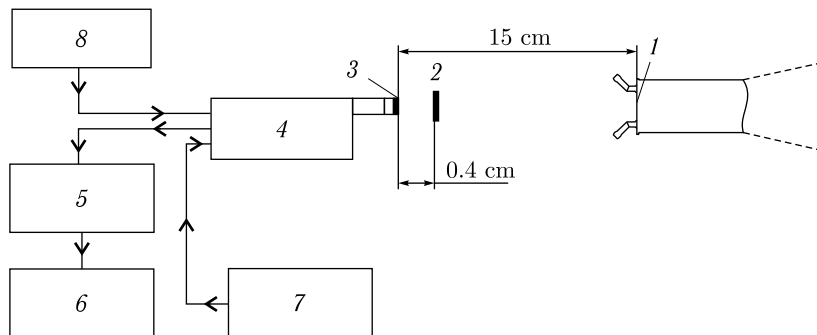


Рис. 1. Схема эксперимента с алмазным детектором: 1 — нейтрон-образующая мишень генератора НГ-11И; 2 — эталонный источник α -частиц ^{226}Ra , зафиксированный относительно детектора; 3 — детектор ДБ-10 с чувствительным элементом из синтетического алмаза. Сигнал с детектора поступал на зарядочувствительный предусилитель ПУГ-37 (4), затем — на спектрометрический усилитель (5) и регистрировался анализатором амплитуд импульсов (6). Для контроля стабильности элементов измерительной схемы на дополнительный вход предусилителя ПУГ-37 подавался сигнал фиксированной амплитуды с генератора импульсов (7). С блока питания (8) на детектор подавалось напряжение -150 В

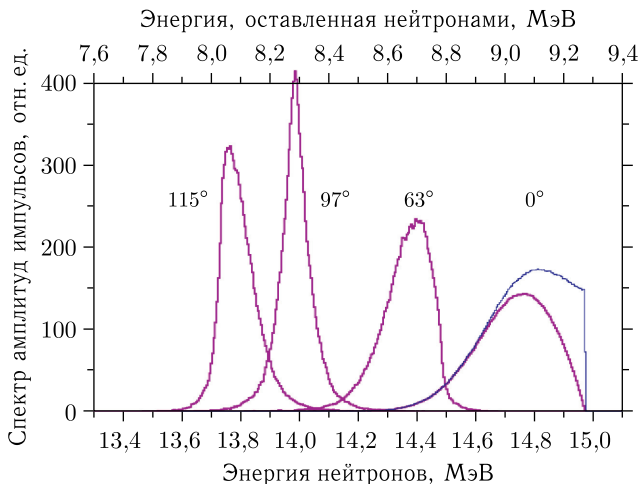


Рис. 2. Результат расчета спектра нейтронов генератора НГ-11И. Показаны спектры нейтронов для четырех значений угла вылета: 0° , 63° , 97° , 115° , рассчитанные с использованием программы SRIANG. Расчет выполнен для мишени с приповерхностным слоем, обедненным тритием. Этим обусловлено отсутствие резкой правой границы у спектров (для сравнения тонкой линией показан спектр для угла вылета 0° , соответствующий мишени без обедненного слоя). Спектр, соответствующий углу вылета 97° , имеет ширину на полувысоте $0,084\text{ МэВ}$

4,784, 5,489, 6,002, 7,687 МэВ. Четко различимые пики в распределении амплитуд импульсов с алмазного детектора, сформированные этими α -частицами, обеспечили однозначную градуировку шкалы анализатора (следует отметить, что постановка измерений с одновременным облучением детектора нейтронами и α -частицами была применена впервые). При этом толщина медной подложки источника α -излучения составляла 1 мм и практически не влияла на спектр ДТ-нейтронов, прилетающих из нейтрон-образующей мишени в детектор. Схема измерений представлена на рис. 1.

Измерения были выполнены для четырех значений угла вылета нейтронов: 0, 63, 97, 115°. Соответствующие спектры нейтронов (рис. 2) были рассчитаны с помощью программы SRIANG [9] на основе результатов моделирования процесса торможения дейтронов в мишени, осуществленного с использованием программы SRIM [10].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Зарегистрированные распределения амплитуд импульсов с алмазного детектора представлены на рис. 3. Все распределения были приведены к единому масштабу шкалы амплитуд импульсов на основе данных о положении пиков, соответствующих регистрации α -частиц.

На первом этапе обработки результатов измерений была определена градуировочная характеристика спектрометра с алмазным детектором.

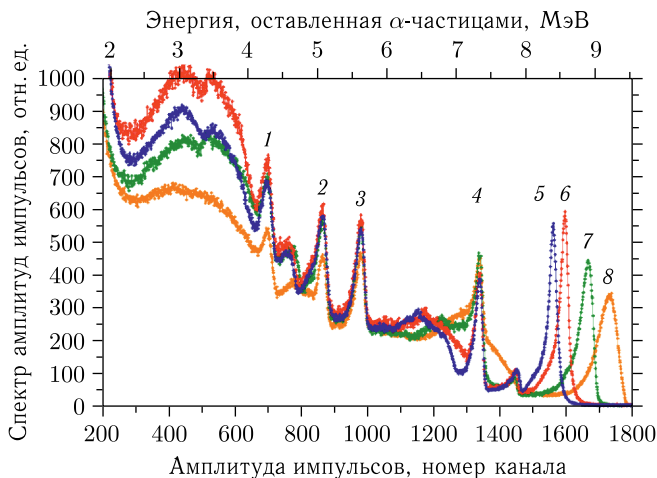


Рис. 3. Экспериментальные распределения амплитуд импульсов. Показаны результаты измерений для четырех значений угла вылета: 0, 63, 97, 115° (пики, соответствующие реакции $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$, отмечены цифрами 5–8). Все распределения приведены к единому масштабу по положению пиков ^{226}Ra (пики, соответствующие регистрации α -частиц, отмечены цифрами 1–4)

Для этого были использованы данные о положении пиков, соответствующих регистрации α -частиц, и значения энергии α -частиц, достигших чувствительной области алмазного детектора. С учетом торможения α -частиц в защитном оксидном слое на поверхности источника ^{226}Ra , в слое воздуха толщиной 0,4 см и в контактном слое на приемной поверхности детектора, значения энергии α -частиц составили 4,295, 5,048, 5,590, 7,343 МэВ (оценки получены с использованием программы SRIM; относительная погрешность оценок составила менее 0,5 %). Градуировочная характеристика по четырем точкам была аппроксимирована линейной зависимостью вида $E_a = Ca + b$, где E_a — энергия α -частиц, C — номер канала анализатора, соответствующий положению пика на шкале амплитуд импульсов; $a = 4,77 \cdot 10^{-3}$ МэВ/канал; $b = 0,950$ МэВ (рис. 4).

На втором этапе обработки из распределения амплитуд импульсов для угла вылета 97° , переведенного на шкалу единиц поглощенной энергии, была восстановлена функция отклика алмазного детектора (рис. 5). При восстановлении использовался спектр нейтронов, рассчитанный для угла вылета 97° по программе SRIANG (см. рис. 2).

На следующем этапе обработки была вычислена свертка восстановленной функции отклика с расчетными распределениями для четырех значений угла вылета нейтронов. Результат свертки был сопоставлен

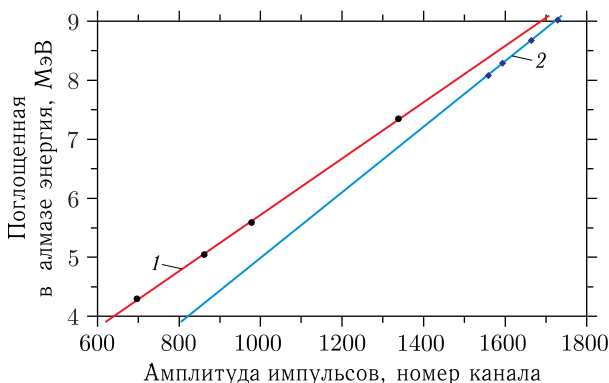


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Градуировочная характеристика спектрометра с алмазным детектором. Черными точками отмечено положение пиков от α -частиц источника ^{226}Ra (значения энергии указаны с учетом торможения α -частиц в воздухе и контактном слое на приемной поверхности детектора). По ним проведена прямая (красная линия 1), связывающая энергию α -частиц и положение соответствующих пиков. Синими точками отмечена средняя энергия распределения, соответствующего регистрации нейтронов, вылетевших под углом 0, 63, 97, 115°. По этим точкам проведена прямая (голубая линия 2), связывающая суммарную энергию частиц, образовавшихся в реакции $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$, и номер соответствующего канала на шкале амплитуд импульсов. Заметно несовпадение двух прямых, указывающее на различия в процессах сбора носителей заряда для α -частиц и ядер бериллия

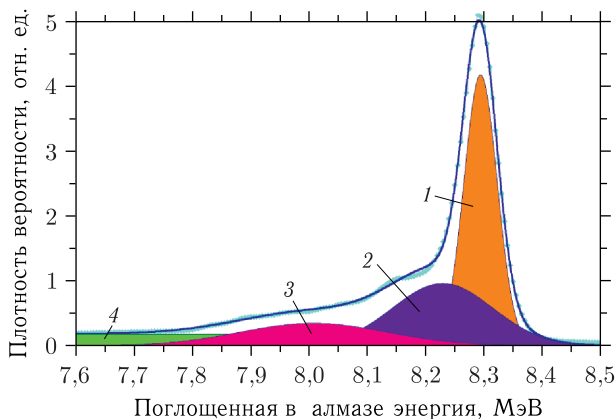


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Функция отклика алмазного детектора. Показана форма функции отклика (голубые точки), восстановленной из экспериментального распределения амплитуд импульсов для угла вылета 97° . Дополнительно показаны составляющие, на которые может быть разложена эта функция отклика: основной пик (оранжевая область 1); второй пик (фиолетовая область 2); третий пик (розовая область 3), смещенный относительно основного пика на 0,3 МэВ; континуум (зеленая область 4). Основной пик описывается гауссианом с параметрами ширины на полувысоте 0,067 МэВ

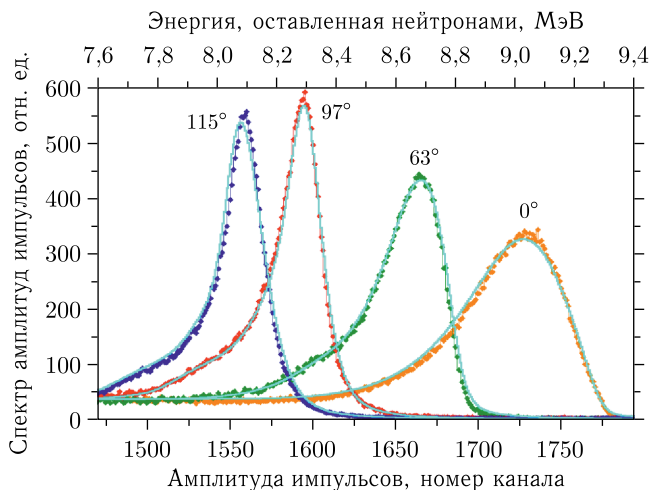


Рис. 6. Результаты совмещения экспериментальных и расчетных распределений. Показаны результаты измерений для четырех значений угла вылета нейтронов: 0, 63, 97, 115° на участке амплитуд импульсов, соответствующем реакции $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$. Расчетные распределения представляют собой результат свертки спектров SRIANG с функцией отклика, полученной при восстановлении из экспериментального распределения для угла вылета 97° (см. рис. 5)

с экспериментальными распределениями амплитуд и определен масштаб шкалы, обеспечивающий максимальное совмещение спектров (рис. 6). Практически полное совмещение экспериментальных и расчетных распределений подтвердило корректность модели расчета спектра ДТ-нейтронов и процедуры восстановления и позволило определить градуировочную характеристику спектрометра с алмазным детектором при регистрации ДТ-нейтронов: $E_d = Ca + b$, где E_d — суммарная энергия частиц, образовавшихся в реакции $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ при регистрации спектра нейтронов, соответствующего выбранному углу вылета, C — номер канала анализатора, соответствующий положению пика на шкале амплитуд импульсов; $a = 5,56 \cdot 10^{-3}$ МэВ/канал, $b = -0,567$ МэВ (см. рис. 4).

Несовпадение двух градуировочных характеристик, заметное по рис. 4, является свидетельством различий в процессах сбора носителей заряда, возникающих при регистрации α -частиц и ядер бериллия. Результаты экспериментов, в которых отмечен дефект амплитуд импульсов или неполный сбор носителей заряда [11–13], также можно рассматривать как указание на эти различия. Отмеченные различия необходимо учитывать при моделировании процессов в алмазном детекторе.

На завершающем этапе обработки восстановленная функция отклика была описана суперпозицией гауссианов. Такое описание позволило оценить соотношение между составляющими функции отклика и определить энергетическое разрешение исследуемого детектора. На рис. 5 показаны составляющие, на которые может быть разложена функция отклика алмазного детектора: основной пик (включающий 33 % импульсов), континуум (32 %), дополнительная структура — пик, смещенный относительно основного пика на 0,070 МэВ (включающий 23 % импульсов), и пик, смещенный относительно основного на 0,300 МэВ (включающий 12 % импульсов). Основной пик описывается гауссианом с шириной на полувысоте 0,067 МэВ, что соответствует энергетическому разрешению 0,5 % при регистрации нейтронов с энергией 14 МэВ.

Наличие дополнительной структуры функции отклика алмазного детектора может быть связано с угловой зависимостью сечения реакции $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ (рис. 7). Представленная на графике зависимость получена на основе результатов работы по измерению сечения реакций на углеороде при энергии нейтронов 14,2 МэВ [14]. На верхней шкале графика указана доля энергии реакции $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$, приходящаяся на α -частицу, в зависимости от угла вылета в лабораторной системе координат. Оценки показывают, что если α -частица вылетает в направлении, близком к направлению движения нейтрона, на нее приходится 95 % энергии, оставленной в алмазе; в случае вылета в противоположном направлении 67 % энергии приходится на ядро бериллия. В последнем случае должны максимально проявляться различия в процессах сбора носителей заряда, возникающих при регистрации α -частиц и ядер бериллия.

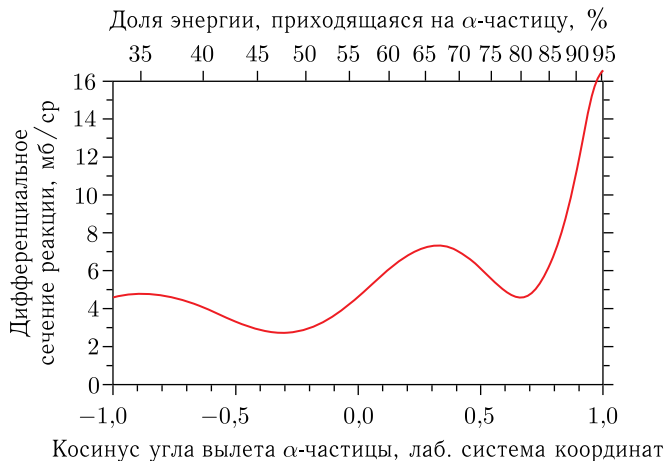


Рис. 7. Угловая зависимость сечения реакции $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$. Представленная зависимость получена на основе результатов работы [14] по измерению и анализу сечения реакций на углероде при энергии нейтронов 14,2 МэВ. На верхней шкале графика указана доля энергии реакции $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$, приходящаяся на α -частицу, в зависимости от угла вылета в лабораторной системе координат

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены результаты, указывающие на различия в процессах сбора носителей заряда, возникающих в алмазном детекторе при регистрации α -частиц и ядер бериллия. Градуировочные характеристики для α -частиц и нейтронов, связывающие энергию частиц и номер канала анализатора, существенно различаются. Показана необходимость определения отдельной градуировочной характеристики спектрометра с алмазным детектором при регистрации нейтронов.

Функция отклика алмазного детектора на участке энергий, соответствующих реакции $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$, существенно отличается от модели, включающей обособленный пик и континуум. При восстановлении спектра нейтронов по результатам измерений с алмазным детектором необходимо учитывать наличие дополнительной структуры в виде двух гауссоподобных пиков, которая может содержать не менее 35 % регистрируемых импульсов.

Финансирование. При выполнении данной работы гранты и любая другая финансовая поддержка не использовалась.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rigamonti D., Giacomelli L., Gorini G., Nocente M., Rebai M., Tardocchi M., Angelone M., Batistoni P., Cufar A., Ghani Z., Jednorog S., Klix A., Laszyska E., Loreti S., Pillon M., Popovichev S., Roberts N., Thomas D.

- Neutron Spectroscopy Measurements of 14 MeV Neutrons at Unprecedented Energy Resolution and Implications for Deuterium–Tritium Fusion Plasma Diagnostics // *Meas. Sci. Technol.* 2018. V. 29, No. 4, P. 045502.
2. Gaganov V. V., Ryabeva E. V., Molodtsev D. A., Ibragimov R. F., Vershinin I. S., Kokorev Y. A., Urupa I. V. Experimental Characterisation of Diamond-Based Neutron Spectrometer // *J. Instrum.* 2022. V. 17, No. 9. P. T09001.
 3. Zimbal A., Giacomelli L., Nolte R., Schuhmacher H. Characterization of Monoenergetic Neutron Reference Fields with a High Resolution Diamond Detector // *Radiat. Meas.* 2010. V. 45, No. 10. P. 1313–1317.
 4. Almaviva S., Marinelli M., Milani E., Prestopino G., Tucciarone A., Verona C., Verona-Rinati G., Angelone M., Lattanzi D., Pillon M., Montereali R. M., Vincenti M. A. Thermal and Fast Neutron Detection in Chemical Vapor Deposition Single-Crystal Diamond Detectors // *J. Appl. Phys.* 2008. V. 103. P. 054501.
 5. Potiron Q., Destouches C., Dubus L., Houry M., Llido O., Lyoussi A., Ottaviani L., Reynard-Carette C. Modelling of a SiC Based Detector for the Interpretation of 14.1 MeV Neutrons Measurements // *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2023. V. 288. P. 03001.
 6. Gaganov V. V., Dolgoplov A. V., Vershinin I. S. On the Structure of the Response Function of a Detector with a Diamond Sensitive Element in DT-Neutron Detection // *Phys. At. Nucl.* 2025. V. 88. P. 2087–2093.
 7. Ibragimov R. F., Urupa I. V., Ryabeva E. V., Kokorev Y. A., Gaganov V. V., Vershinin I. S. Fast Neutron Spectrometer Based on a Diamond Sensor Detector // *At. Energy.* 2024. V. 134, No. 1–2. P. 81–87.
 8. Gaganov V. V., Dolgoplov A. V., Kuzma M. M. Detailed Simulation of the DT-Neutron Source and Its Technological Surroundings // *Radiat. Phys. Chem.* 2025. V. 236. P. 112905.
 9. Gaganov V. V. Calculation of Neutron Spectra Produced in Neutron Generator Target: Code Testing // *Appl. Radiat. Isot.* 2018. V. 133. P. 85–87.
 10. Ziegler J. F., Ziegler M. D., Biersack J. P. SRIM — The Stopping and Range of Ions in Matter // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2010. V. 268, No. 11–12. P. 1818–1823.
 11. Sato Y., Shimaoka T., Kaneko J. H., Murakami H., Tsubota M., Chayahara A., Umezawa H., Shikata S. Pulse Height Reduction Effect of Single-Crystal CVD Diamond Detector for Low-Energy Heavy Ions // *Europhys. Lett.* 2013. V. 104, No. 2. P. 22003.
 12. Beliuskina O., Strekalovsky A. O., Aleksandrov A. A., Aleksandrova I. A., Devaraja H. M., Heinz K., Heinz S., Hoffmann S., Ilich S., Imai N., Kamanin D. V., Kis M. et al. Pulse-Height Defect in Single-Crystal CVD Diamond Detectors // *Eur. Phys. J. A.* 2017. V. 53. P. 0032.
 13. Hodgson M., Lohstroh A., Sellin P., Thomas D. Neutron Detection Performance of Silicon Carbide and Diamond Detectors with Incomplete Charge Collection Properties // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2017. V. 847. P. 1–9.
 14. Kondo K., Murata I., Ochiai K., Kubota N., Miyamaru H., Konno C., Nishitani T. Measurement and Analysis of Neutron-Induced Alpha Particle Emission Double-Differential Cross Section of Carbon at 14.2 MeV // *J. Nucl. Sci. Technol.* 2008. V. 45, No. 2. P. 103–115.