

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ МЕЧЕНЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

*В. Ф. Батяев^a, С. Г. Беличенко^a, М. Д. Каретников^{a, 1},
А. Д. Мазницин^a, А. Ю. Пресняков^a*

^a Всероссийский исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия

Появление ресурсоемкого и интенсивного генератора меченых нейтронов ИНГ-27, разработанного во ФГУП ВНИИА, с уникальными временным и пространственным разрешениями измерения вылета нейтронов привело к существенному расширению области применения меченых нейтронов. В работе обсуждаются возможности применения устройств с мечеными нейтронами для решения некоторых задач прикладной ядерной физики, в частности, исследования эффекта Доплера, анизотропии выхода гамма-квантов при неупругом рассеянии нейтронов, измерения нейтронного отклика от гамма-детектора.

The high-intensity and long lifetime tagged neutron generator with the unique time and spatial resolution, developed by FSUE VNIIA, promoted a wider utilization of tagged neutrons. Some usages of tagged neutron devices for applied nuclear problems are considered, particularly the study of the Doppler effect and anisotropy of gamma rays emitted at the inelastic neutron scattering, as well as determination of gamma-detectors response to 14-MeV neutrons.

PACS: 25.40.Fq; 28.20.Np; 07.85.Nc; 29.30.Kv

ВВЕДЕНИЕ

Ключевым элементом для реализации метода меченых нейтронов (ММН) является нейтронный генератор с встроенным позиционно-чувствительным детектором альфа-частиц, позволяющим определять время и направление вылета 14-МэВ нейтрона, рождающегося вместе с альфа-частицей в реакции синтеза. В зависимости от решаемой задачи в устройствах ММН производится регистрация гамма-излучения, возникающего при неупругом рассеянии меченых нейтронов с ядрами вещества, или самих рассеянных меченых нейтронов в совпадениях с сигналами от альфа-детектора. Энергетические и угловые характеристики регистрируемого излучения несут информацию о ядре-рассеивателе, поэтому практическое применение ММН связано с нейтронным анализом состава вещества или исследованием самих ядер [1].

В генераторах меченых нейтронов ИНГ-27 производства ФГУП ВНИИА устанавливают планарные кремниевые или арсенид-галлиевые детекторы. Последние выполнены на одном кристалле с количеством пикселей 256 размером 2×2 или 4×4 мм,

¹E-mail: mcsym01@gmail.com

которые образованы пересечением ортогональных стрипов. Собственное временное разрешение альфа-детектора составляет менее 1 нс, эффективность регистрации от 95 до 98%. Разработанная специализированная система сбора МАВР (многоканальный амплитудно-временной регистратор) данных для систем с мечеными нейтронами позволяет одновременно регистрировать события (альфа-гамма-совпадения) и гамма-спектры без совпадений при практически любых количестве гамма-детекторов и степени пикселизации альфа-детектора [2].

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И УГЛОВЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ НЕУПРУГОМ РАССЕЯНИИ НЕЙТРОНОВ

При проведении нейтронного анализа с мечеными нейтронами результатом измерений является спектр откликов гамма-детекторов, измеренных в каждом элементарном объеме (вокселе) облучаемого объекта. После обработки гамма-спектр представляется в виде коэффициентов разложения k_i исходного спектра $S(E)$ на базисные спектры $S_i(E)$, на основе которых можно определить соотношения интересующих химических элементов i в составе исследуемого объекта $S(E) = \sum_{i=C,N,O,\dots,n} k_i S_i(E)$ [3]. При исследовании протяженных объектов или при многоуровневом расположении гамма-детекторов относительно нейтронного генератора, когда гамма-кванты попадают на детекторы под разными углами ϕ относительно потока меченых нейтронов, гамма-спектр для некоторых химических элементов зависит от угла ϕ вследствие эффекта Доплера и анизотропии выхода гамма-квантов из возбужденных ядер. Соответственно, коэффициенты разложения k_i и соотношения определяемых химических элементов (элементный состав) объекта меняются в зависимости от угла ϕ .

Для количественного анализа энергетических и угловых корреляций гамма-излучения при неупругом рассеянии нейтронов необходимо обеспечить эффективное подавление фона от источника нейтронов на гамма-детектор, прецизионное измерение нейтронного потока и низкую погрешность измерения энергии гамма-квантов. Это позволяет осуществить ММН-системы, используя следующие особенности:

— Измерение нейтронного потока встроенным альфа-детектором с абсолютной погрешностью менее 5%, а относительной менее 1%, что существенно меньше погрешности стандартных средств измерения [4].

— Эффективная пространственно-временная дискриминация сигналов с детекторов, не сопровождаемых сопутствующими альфа-частицами. Это позволяет подавить спектральный фон на несколько порядков [1].

— Возможность online калибровки гамма-детекторов с помощью специальных объектов-калибраторов, испускающих при прохождении в них меченых нейтронов гамма-линии, которые легко интерпретируются на гамма-спектре, а также с помощью гамма-линий от эталонных радионуклидов в гамма-спектре без совпадений, причем за счет пространственно-временной дискриминации сигналов эти гамма-линии практически отсутствуют в спектре альфа-гамма-совпадений.

— Определение угла вылета нейтрона с погрешностью около 0,02 рад (при использовании 256-пиксельного альфа-детектора с размером пикселя 2×2 мм).

Влияние эффекта Доплера на гамма-спектры при неупругом рассеянии нейтронов изучалось с помощью ММН в работе [4]. Было показано, что происходит сдвиг

и уширение некоторых пиков на гамма-спектре, например, для линии 4,438 МэВ (рассеяние нейтронов на ядрах углерода С-12) максимальный сдвиг составляет около 1 %, а уширение до 2 %. Заявленная точность определения положения пика составляла 0,1 %, что достигалось online калибровкой гамма-детектора по гамма-спектрам без совпадений и в совпадениях с альфа-частицами.

Экспериментальные значения угловых распределений гамма-квантов при неупругом рассеянии 14-МэВ нейтронов характеризуются достаточно большим разбросом между собой [1]. Это может быть связано, в том числе, с зависимостью результатов от геометрии установки (например, положения и размеров гамма-детектора и облучаемого объекта), влиянием фона, способов определения характеристик пиков в гамма-спектре. В связи с этим для ММН-устройств целесообразно исследовать угловые зависимости выхода интересующих гамма-линий в рабочей геометрии установки с используемыми алгоритмами измерения пиков.

Для исследования анизотропии выхода гамма-квантов при неупругом рассеянии меченых нейтронов был создан экспериментальный стенд на базе генератора меченых нейтронов ИНГ-27 с 256-пиксельным альфа-детектором с размером пикселя 2×2 мм. Сигналы с альфа- и гамма-детекторов регистрировали системой сбора МАВР. Ограниченное количество доступных детекторов не позволяло выполнить их кольцевое расположение аналогично детекторной системе «Ромашка» [1]. Для уменьшения общего времени эксперимента измерения проводили двумя детекторами с кристаллом LYSO диаметром 76 мм и высотой 76 мм, которые смещали в азимутальном направлении, сохраняя неизменным расстояние между центрами кристалла детектора и объекта, равное 245 мм, а ось кристалла ориентировали на объект (рис. 1). Диапазон смещения детектора $1 \varphi_1$ составлял от 30° до 90° , детектора 2 — от 90° до 150° с шагом 10° . Поскольку гамма-детекторы при малых ($0-30^\circ$) или больших ($150-180^\circ$) углах относительно потока меченых нейтронов устанавливать не планируется, измерения в этих областях не проводили.

В качестве объектов исследования использовали контейнеры размером $80 \times 80 \times 80$ мм, заполненные: графитом (рассеяние нейтронов на углероде), меламином

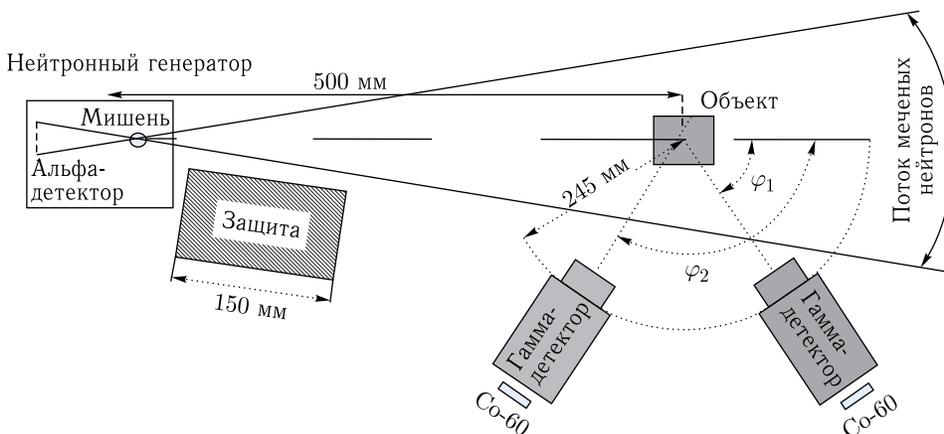


Рис. 1. Геометрия эксперимента при измерении анизотропии выхода гамма-квантов

(рассеяние на азоте) и водой (рассеяние на кислороде). Online калибровку в экспериментах производили по образцовому гамма-источнику Co-60 для калибровки по гамма-линиям 1,173, 1,333 и суммарному пику 2,506 МэВ в гамма-спектре без совпадений.

Результатами измерений были события-сигналы с гамма-детекторов, сопровождающиеся регистрацией сигналов с альфа-детектора в узком временном диапазоне. События представлялись четырьмя параметрами: номер сработавшего пикселя альфа-детектора, номер гамма-детектора, время между моментами регистрации сигналов с гамма- и альфа-детекторов, амплитуда сигнала с гамма-детектора. Из совокупности событий селектировали события, соответствующие пикселям альфа-детектора, при срабатывании которых меченые нейтроны проходили через исследуемый объект, и для них определяли временной спектр альфа-гамма-совпадений (рис. 2, а).

На временном спектре видно два пика, один из которых соответствует времени прохождения меченых нейтронов через объекты, второй — попаданию на гамма-детектор меченых нейтронов, отклонившихся от начальной траектории при упругом и неупругом рассеянии на ядрах объекта (время на рисунке — реверсивное, так как стартовым сигналом в системе МАВР является сигнал с гамма-детектора). Первый пик аппроксимировали гауссовым распределением, и выделялись события, находящиеся во временном окне — от $2\sigma + T$ до $T + 2\sigma$, где T — центроида пика, а σ — дисперсия гауссова распределения. Практически во всех измерениях σ была равна 0,5 нс. Из рис. 2, а видно, что временное окно 4σ дает хорошее разделение между первым и вторым пиками.

Для выделенных событий определяли энергетический спектр (рис. 2, б). Также во временном окне 30 нс (рис. 2, а) выявляли спектр фона случайных совпадений, пересчитывали его на временное окно 4σ (равное 2 нс) и вычитали из энергетического спектра. После этого рассчитывали положение центроиды пиков полного поглощения за вычетом подложки пиков, обусловленной комптоновским континуумом и внешним комптоном.

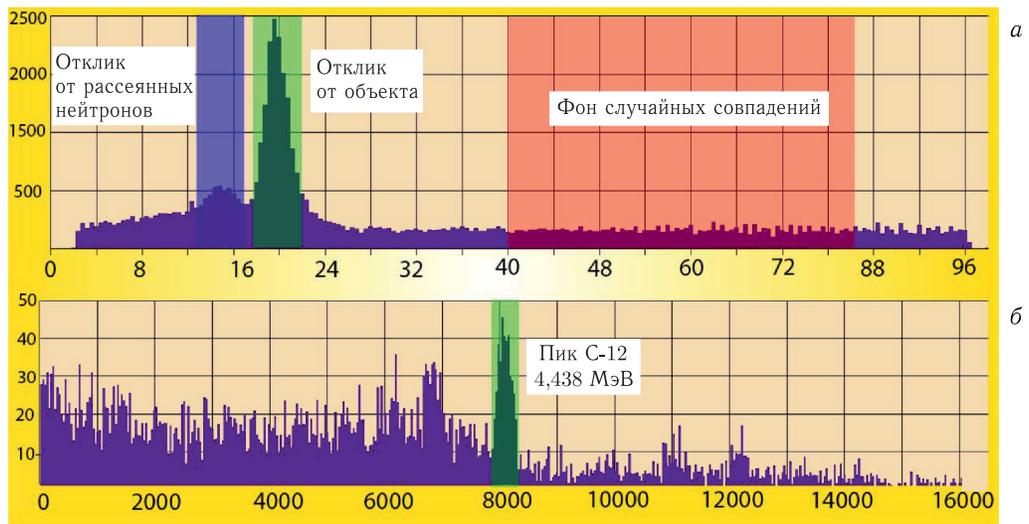


Рис. 2. Временной (а) и энергетический (б) спектры альфа-гамма-совпадений

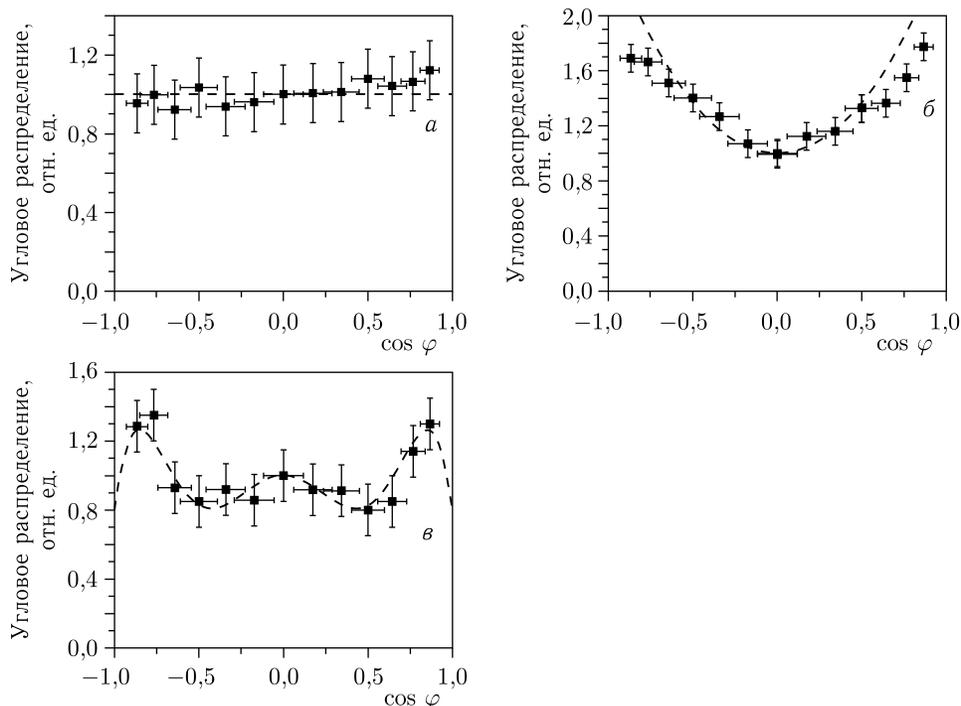


Рис. 3. Угловые распределения выхода гамма-квантов при неупругом рассеянии меченых нейтронов на ядрах азота, пик 2,316 МэВ (а), углерода, пик 4,438 МэВ (б), кислорода, пик 6,129 МэВ (в)

Для достижения статистической погрешности измерения положения пика меньше 0,1 % эксперимент проводили до достижения количества отсчетов в области фотопика (FWHM) не менее 250. Обычно это составляло около 10 мин. Результаты для обоих детекторов на разных углах φ_1 и φ_2 нормировали на значение, полученное при угле $\varphi = 90^\circ$, для «сшивки» результатов измерений.

На рис. 3, а–в показаны измеренные угловые распределения и аппроксимированные данные из библиотеки ENDF [5], представленные в ней коэффициентами разложения по полиномам Лежандра. Следует отметить достаточно хорошее соответствие между измеренными и библиотечными зависимостями, а также угловыми распределениями из работы [1], определенными с помощью ММН. В целом полученные нами зависимости более «сглаженные», что обусловлено усреднением по углу за счет близкого расположения гамма-детекторов к объекту.

ИЗМЕРЕНИЕ ОТКЛИКА ГАММА-ДЕТЕКТОРА ПРИ ЕГО ОБЛУЧЕНИИ 14-МЭВ НЕЙТРОНАМИ

Измерение гамма-спектра в присутствии фоновых 14-МэВ нейтронов актуально для многих задач прикладной ядерной физики, например, термоядерных исследований, нейтронного активационного анализа. При обработке результатов измерений необходимо учитывать вклад быстрых нейтронов в результирующий аппаратный спектр. Для нахождения отклика гамма-детектора при облучении быстрыми нейтро-

нами используют расчетные и экспериментальные методы. Определенную трудность при расчетах составляет учет световыхода от вторичных заряженных частиц, возникающих в реакциях (n, p) , (n, d) и (n, α) , и вариаций световыхода кристаллов одного типа в зависимости от качества исходного сырья и технологии изготовления [6].

Для осуществления ММН, по сравнению с другими времяпролетными методами создания моноэнергетичного потока быстрых нейтронов для определения нейтронного отклика детекторов, требуется гораздо более дешевое и доступное оборудование. Экспериментальное исследование нейтронного отклика гамма-детектора проводили на установке, аналогичной представленной на рис. 1, но вместо объекта исследования вдоль оси пучка меченых нейтронов располагали гамма-детекторы с различными сцинтилляторами (BGO, LYSO, $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$). В зависимости от расстояния между гамма-детектором и мишенью нейтронного генератора можно облучать гамма-детектор либо «узким» пучком нейтронов, выделяя события для одного, например, центрального пикселя, либо широким пучком, когда конус вылета меченых нейтронов полностью покрывает гамма-детектор. Важной особенностью использования метода меченых нейтронов в данных экспериментах является эффективная дискриминация фона от активации кристаллов в процессе облучения, в первую очередь, за счет реакций $(n, 2n)$, а также от собственной активности кристаллов.

В качестве примера на рис. 4 приведены нормированные энергетические спектры для исследуемых сцинтилляторов. На основании полученных данных были оценены

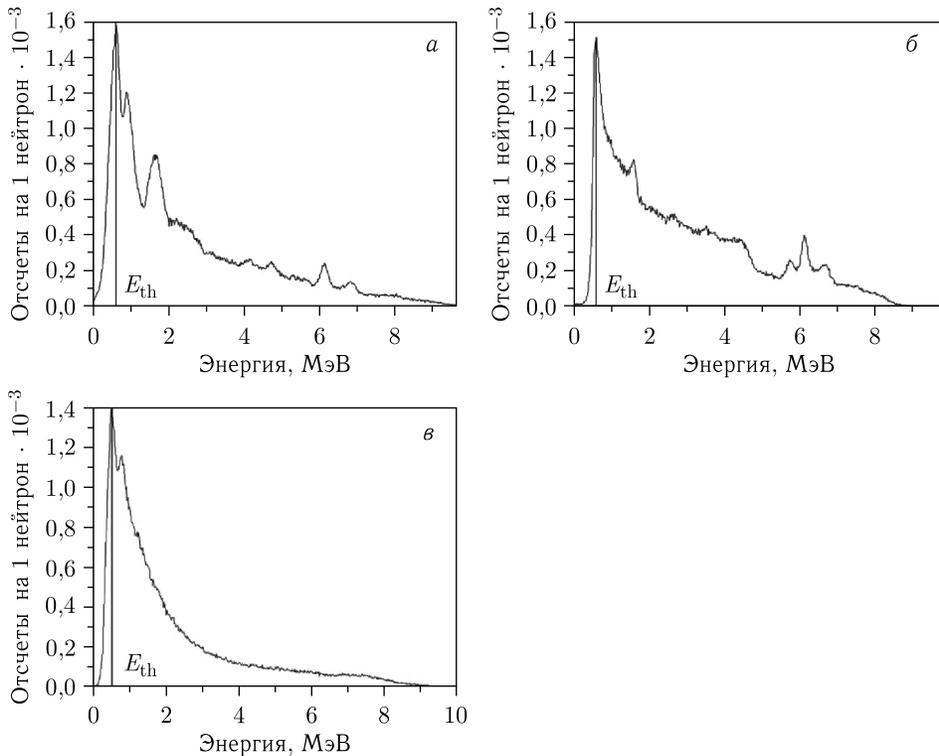


Рис. 4. Энергетические спектры гамма-детекторов на основе кристаллов BGO (а), LYSO (б), $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ (в), нормализованные на 1 нейтрон

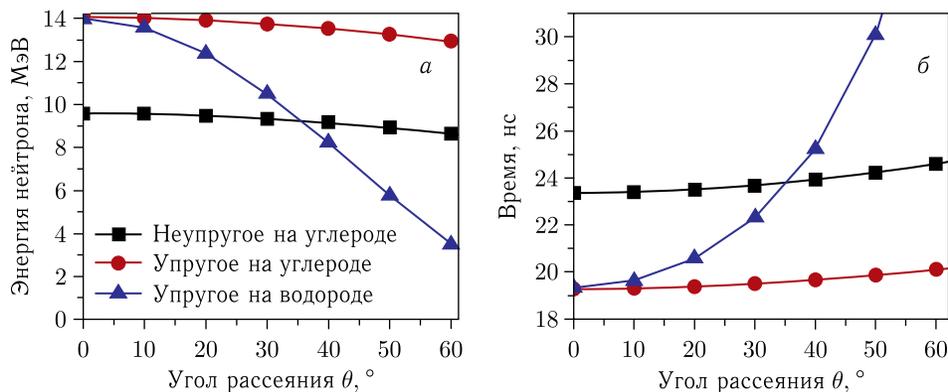


Рис. 5. Зависимость энергии нейтронов (а) и времени прохождения рассеянными нейтронами расстояния 1 м после взаимодействия (б) при рассеянии на ядрах углерода и водорода от угла рассеяния θ

эффективности регистрации 14-МэВ нейтронов выше порога 0,6 МэВ по спектру гамма-излучения, которые составили, соответственно: BGO — 0,50, LYSO — 0,56, LaBr₃(Ce) — 0,37.

Метод меченых нейтронов позволяет также измерять отклик детекторов при прохождении в них нейтронов разных энергий. При однократном акте рассеяния энергия нейтрона зависит от угла рассеяния θ как

$$E_n = \left(\frac{a}{2} \cos \theta + \frac{1}{2} \sqrt{a^2 \cos^2 \theta + 4b} \right)^2, \quad (1)$$

где $a = \frac{2}{M+1} \sqrt{E}$, $b = \frac{M-1}{M+1} E - \frac{M}{M+1} U$, M — отношение массы ядра и нейтрона, U — энергия возбуждения ($U > 0$ при неупругом рассеянии и $U = 0$ при упругом). Таким образом, устанавливая детекторы под разными углами θ относительно направления меченых нейтронов, можно исследовать отклик детектора при прохождении нейтронов разных энергий. На рис. 5 показаны значения энергии нейтронов после рассеяния на ядрах углерода и водорода и времени прохождения нейтронами расстояния 1 м после взаимодействия. Видно, что при таком пролетном расстоянии и наносекундном временном разрешении альфа-гамма-совпадений можно отдельно выделять события, соответствующие нейтронам различных энергий. В качестве примера успешной реализации такого метода можно привести работу [7], в которой изучали отклик нейтронных детекторов на меченые нейтроны с энергией от 2 до 14 МэВ, рассеянных на углероде и полиэтилене.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерено угловое распределение гамма-пиков с энергиями 4,438, 2,316 и 6,129 МэВ гамма-квантов при неупругом рассеянии нейтронов на ядрах углерода, азота и кислорода. Полученные результаты могут быть полезны при обработке

гамма-спектров в методе меченых нейтронов, когда гамма-кванты попадают на детекторы под различными углами относительно потока меченых нейтронов. Метод меченых нейтронов может быть рекомендован для прецизионной нейтронной калибровки и измерения отклика при прохождении нейтронов в гамма-детекторах, а также детекторов ядерного излучения других типов, например, полупроводниковых и алмазных детекторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Копач Ю. Н., Сапожников М. Г.* Применение метода меченых нейтронов для фундаментальных и прикладных исследований // ЭЧАЯ. 2024. Т. 55, вып. 1. С. 103–177.
2. *Батяев В. Ф. и др.* Система сбора данных многодетекторного устройства с мечеными нейтронами с параллельной передачей событий // ПТЭ. 2024. № 1. С. 5–15.
3. *Carso C. et al.* In-Field Tests of the EURITRACK Tagged Neutron Inspection System // Nucl. Instr. Meth. A. 2008. V. 588. P. 307–405.
4. INPA — Automatic Neutron Flux Meter. <https://vniia.ru/eng/production/neitronnie-generatory/izmerenie-potoka-neitronov/inpa/inpa-izmeritel-neytronnogo-potoka-avtomatizirovannyu.php> (accessed 18.02.2024).
5. Evaluated Nuclear Data File (ENDF). <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm> (accessed 10.10.2022).
6. *Avdeichikov V. et al.* Range Energy Relation, Range Straggling and Response Function of CsI(Tl), BGO and GSO(Ce) Scintillators for Light Ions // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 439. P. 158–166.
7. *Prusachenko P. S. et al.* Characterization of an EJ-200 Plastic Scintillator Array for Experiments with 14-MeV Tagged Neutrons Using the Carbon and Polyethylene Samples // Nucl. Instr. Meth. A. 2025. V. 1072. P. 1–9.

Получено 9 июля 2025 г.