

О РЕГИСТРАЦИИ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫМ ДЕТЕКТОРОМ $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$

Т. М. Кормилицын^{а, б, 1}, *С. Ю. Обудовский*^а, *Ю. А. Кащук*^{а, б},
Р. Н. Родионов^а, *А. В. Панкратенко*^б, *А. С. Джурик*^а

^а Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва

^б Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет), Москва

Большинство современных установок управляемого термоядерного синтеза с магнитным удержанием работают с дейтериевой плазмой, излучающей нейтроны с энергией $\sim 2,5$ МэВ. Выход термоядерных нейтронов указывает на эффективность нагрева и удержания плазмы. Таким образом, задача точного измерения плотности потока быстрых нейтронов является крайне важной в термоядерных исследованиях. В работе рассмотрена возможность использования кристалла LaCl_3 , активированного церием, для регистрации быстрых нейтронов. Характеристики сцинтилляционного детектора исследованы с помощью эталонных γ -источников и источника быстрых нейтронов на основе генератора 2,5-МэВ нейтронов ИНГ-07Д (нейтронный выход — $1 \cdot 10^7$ с⁻¹). Для моделирования функции отклика при регистрации нейтронного и γ -излучения использован код GEANT4. Полученные результаты показывают перспективность применения детектора на основе кристалла $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ для регистрации потока нейтронов из дейтериевой плазмы.

The majority of modern Magnetic Confinement Fusion devices feature deuterium plasma with emission of 2.5 MeV neutrons. The neutron yield during the discharge gives information on plasma heating and confinement efficiency. Hence, the challenge of the fast DD-neutron flux measurements becomes an increasingly important task for fusion research. Current work studies the possibility of application of a scintillator crystal $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ to this task. Scintillator detector characteristics were studied using the reference γ sources and a 2.5 MeV neutron generator ING-07D with the neutron yield of up to $\sim 1 \cdot 10^7$ s⁻¹. The GEANT4 code was used for numerical modeling of the detector response to neutron and γ irradiation. The results provide a promising outlook on the application of the $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ crystal for the purposes of fast DD-neutron measurements.

PACS: 29.40.Mc; 29.30.Hs; 29.30.Kv; 28.52.-s; 28.52.Av

ВВЕДЕНИЕ

Сцинтилляционные детекторы повсеместно используют для регистрации быстрых нейтронов. Как правило, это органические сцинтилляторы, в которых регистрируются протоны отдачи в результате реакции упругого рассеяния нейтронов на ядрах водорода. Некоторые из них характеризуются высоким быстродействием (например, пластики ВС-404, ВС-422 и др. с временем высвечивания 1–2 нс). Другие обладают

¹E-mail: timofey.kormilitsyn@phystech.edu

свойством разделения сигналов нейтронного и гамма-излучения по форме импульса (NE213, BC-501A, стильбен и др.). К достоинствам этих сцинтилляторов можно отнести высокую чувствительность за счет построения детекторов большого объема и доступность (низкая стоимость). К проблемам работы с этими детекторами следует отнести сложный вид функции отклика при регистрации нейтронов и гамма-квантов, что требует специальной процедуры восстановления энергетических спектров. Методологические вопросы, связанные с разделением сигналов по форме импульса и восстановлением энергетических спектров нейтронов, были успешно решены, однако следует отметить, что для корректного восстановления нейтронного спектра необходима детальная информация о функции отклика во всем энергетическом диапазоне и хорошая статистика измерений.

Разработанные в конце 1990-х гг. сцинтилляционные материалы из семейства галогенидов лантана ($\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ и $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$) характеризуются хорошим энергетическим разрешением (менее 3% по линии 662 кэВ в отличие от 6–7% у $\text{NaI}(\text{Tl})$), быстрым временем высвечивания (26–28 нс), высоким световыходом (на 20–70% выше, чем у $\text{NaI}(\text{Tl})$) и высокой эффективностью регистрации гамма-квантов [1]. Эти детекторы вдохнули вторую жизнь в сцинтилляционный метод спектрометрии гамма-излучения. Нейтронные сцинтилляционные детекторы получили свое развитие на основе эльпасолитов – таких материалов, как CLYC, CLLB, CLLBC и др. Особый интерес представляют сцинтилляционные кристаллы $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6(\text{Ce})$, или CLYC, обладающие хорошим энергетическим разрешением и возможностью разделения нейтронов и гамма-квантов по форме импульсов. С помощью сцинтиллятора CLYC регистрируют тепловые нейтроны, если в кристалле используют литий, обогащенный по изотопу ^6Li . Если использовать обогащенный ^7Li , то спектрометрия быстрых нейтронов может быть реализована на реакциях $^{35}\text{Cl}(n, p)$ и $^{35}\text{Cl}(n, \alpha)$. К недостаткам кристаллов CLYC можно отнести достаточно длительное время высвечивания (~ 1 мкс), что ограничивает быстродействие детектирующих систем из-за наложений импульсов [2].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Наличие ядер ^{35}Cl в исследуемом кристалле LaCl_3 позволяет рассматривать данный кристалл в качестве перспективного материала чувствительного элемента детектора быстрых DD-нейтронов (характерная энергия нейтронов, рожденных в реакции слияния двух ядер дейтерия $\sim 2,45$ МэВ), так как именно в области энергий от 1,5 до 5 МэВ сечение реакции (n, p) приближается к 0,1 б. В таблице собраны несколько представляющих интерес для данной работы каналов реакций (n, p) и (n, α) .

Связь энергии протона и налетающего нейтрона в реакциях 1–3 можно считать приближенно линейной $E_p \sim E_n$. Схожая зависимость справедлива и для энергии α -частицы в реакциях 4–6. Далее будут рассмотрены принципиальные отличия реакций, представленных в таблице.

На рис. 1 представлены сечения реакций (n, p) для случаев образования в качестве продукта реакции ядра серы в различных состояниях – основном, первом возбужденном и втором возбужденном. Также на рис. 1 представлено сечение реакции (n, α) для случаев, в которых образуется ядро фосфора в одном из тех же трех состояний.

Основные каналы реакций (n, p) и (n, α) на ядрах ^{35}Cl

№	Реакция	Состояние образовавшегося ядра	Q , МэВ
1	$^{35}\text{Cl}(n, p)^{35}\text{S}$	Основное состояние	0,615
2		Первое возбужденное состояние	-0,956
3		Второе возбужденное состояние	-1,376
4	$^{35}\text{Cl}(n, \alpha)^{32}\text{P}$	Основное состояние	0,938
5		Первое возбужденное состояние	0,860
6		Второе возбужденное состояние	0,425

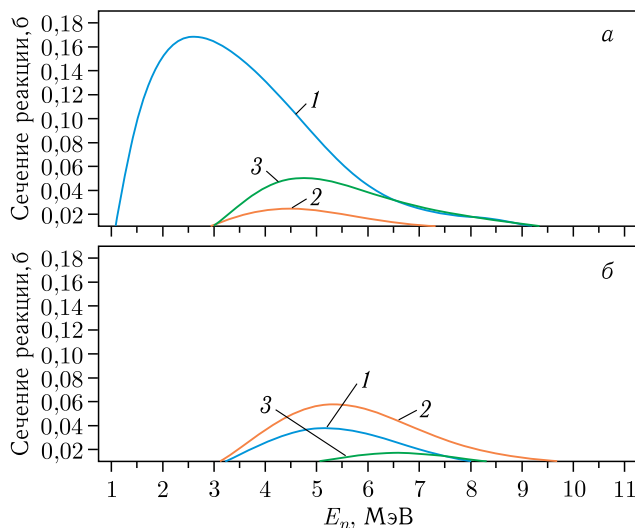


Рис. 1. Сечения реакций $^{35}\text{Cl}(n, p)^{35}\text{S}$ (а) и $^{35}\text{Cl}(n, \alpha)^{32}\text{P}$ (б) [3]. Представлены сечения реакции с образованием остаточного ядра в основном (1), первом возбужденном (2) и втором возбужденном (3) состояниях

Наиболее «полезной» с точки зрения регистрации быстрых нейтронов реакцией является $^{35}\text{Cl}(n, p)^{35}\text{S}_{(g.s)}$ (1). Это обусловлено целым рядом причин. Среди этих причин основной является тот факт, что сечение лишь этой реакции достаточно велико в «зоне интереса» — в диапазоне с энергиями нейтрона от 1,5 до 5 МэВ. Более того, при рассмотрении реакций 2 и 3 из таблицы оказывается, что значение Q для этих реакций принимает отрицательные значения (-0,956 МэВ и -1,376 МэВ соответственно), что отделяет отсчеты на амплитудном спектре детектора от основной группы, сдвигая их в зону меньших энергий. Такие отсчеты с большой вероятностью могут оказаться неразличимыми на фоне отсчетов, вызванных γ -излучением.

Сопоставив по величине чувствительность сцинтиллятора к нейтронному и γ -излучению заставляет искать способы отделить одни сигналы от других либо с использованием дополнительного экранирующего материала, либо применяя технику разделения сигналов по форме импульса.

Диапазон энергий, в котором сечение (n, α)-реакций (4–6 в таблице) принимает достаточно высокое значение, ограничен снизу энергией ~ 3 МэВ, как и в случае с реакциями 2–3 в таблице.

Важно упомянуть, что характерной чертой сцинтилляторов является нелинейная зависимость световыхода от энергии регистрируемого излучения. При условии одинаковых энергий световыход имеет зависимость, противоположную массе частицы. Так, для тяжелого иона световыход кристалла будет пренебрежимо мал. Как следствие, калибровка сцинтилляционного спектрометра в шкале энергий должна производиться отдельно для каждого типа регистрируемого излучения.

Ввиду схожих с лантаном химических свойств в кристалле LaCl_3 присутствует изотоп актиния ^{227}Ac . Это приводит к появлению у кристалла собственного фона за счет регистрации γ - и α -излучения при распаде этого изотопа [4]. Наличие собственного излучения с известными характерными энергиями может дать возможность контролировать световыход сцинтиллятора.

Таким образом, возникает задача исследования характеристик сцинтилляционного детектора на основе кристалла $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ в качестве спектрометра-радиометра потока DD-нейтронов. Можно выделить следующие шаги на пути к ее решению:

- исследование отклика LaCl_3 при регистрации γ -излучения;
- анализ амплитудного спектра LaCl_3 в поле излучения DD-нейтронного генератора;
- разработка алгоритма $\alpha/p/\gamma$ -разделения по форме импульса.

ОПИСАНИЕ СПЕКТРОМЕТРА

Для полноценного исследования свойств кристалла первым шагом является сборка сцинтилляционного детектора на его основе. Экспериментальный измерительный тракт включает в себя кристалл $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ производства Hangzhou Shalom Electro-optics и фотоэлектронный умножитель Hamamatsu R6231-100 (максимальное напряжение — до 1,5 кВ) в корпусе из алюминия и магнитомягкого железа суммарной толщиной ~ 10 мм. Схема измерительного тракта представлена на рис. 2.

Для подачи напряжения на ФЭУ используется высоковольтный блок питания NHQ 205M. Для калибровки и абсолютных измерений используется схема с усилителем-формирователем CAEN N968. Обработка усиленного сигнала происходит с помощью многоканального анализатора 14-bit USB-8K-V1 НПЦ «АСПЕКТ», работающего с частотой 100 МГц. Контроль напряжения на ФЭУ, параметров АЦП и запись данных осуществлялись с помощью специализированного ПО.

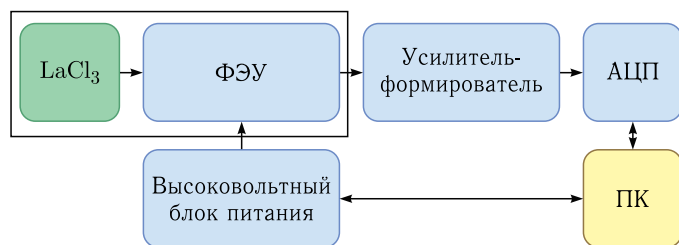


Рис. 2. Схема измерительного тракта сцинтилляционного детектора на основе кристалла $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$

Калибровка спектрометра в шкале энергий γ -излучения проводилась с использованием образцовых спектрометрических γ -источников (^{137}Cs , ^{60}Co , ^{22}Na). Также для калибровки, с целью исследования высокоэнергетической части наблюдаемого спектра, применялся источник ^{24}Na , испускающий γ -частицы энергий 1368 и 2754 кэВ. Нарботка этого изотопа проходила путем облучения образца из высокочистого алюминия в поле излучения ДТ-нейтронного генератора ИНГ-07Т (выход генератора $\sim 5 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$).

Гамма-источник ^{137}Cs с референсной линией γ -излучения 661 кэВ был использован для исследования зависимости энергетического разрешения детектора от напряжения на ФЭУ. На рис. 3, б представлены результаты исследования; напряжение на ФЭУ варьировалось в диапазоне 800–1300 В. Длительность экспозиции в каждом случае составляла 100 с, измерения проводились при фиксированных параметрах измерительного тракта. Оптимум энергетического разрешения ($\sim 3\%$) достигается при работе ФЭУ с напряжением более 1200 В. Несмотря на это, достичь наиболее линейного режима работы ФЭУ удалось при снижении напряжения до 850 В (рис. 4).

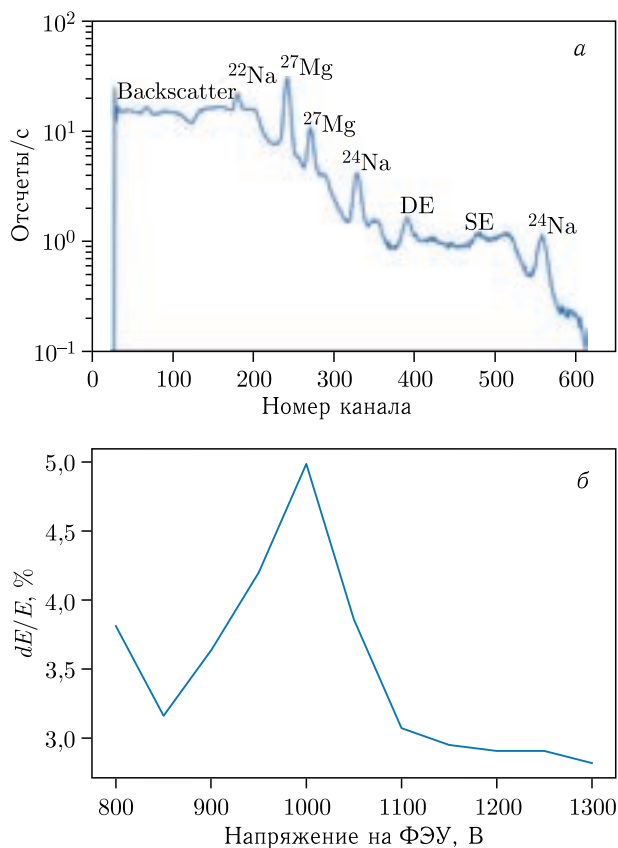


Рис. 3. а) Амплитудные спектры сцинтиляционного детектора на основе $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ в поле специального калибровочного источника ^{24}Na . б) Зависимость энергетического разрешения детектора dE/E от напряжения на ФЭУ

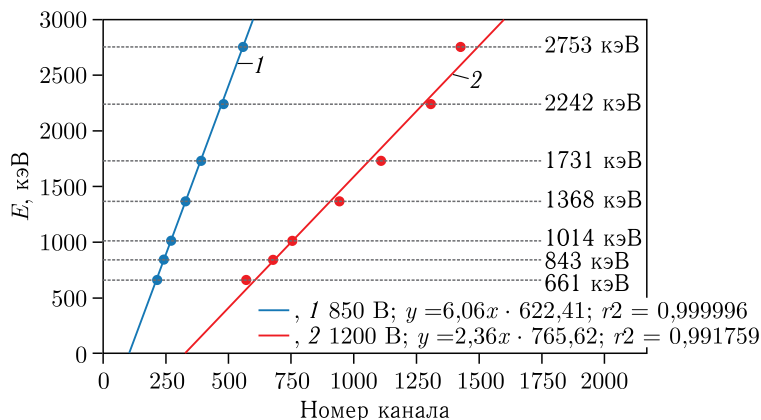


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Калибровочные прямые спектрометра на основе кристалла $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$, полученные на основе экспериментально определенных γ -пиков ^{27}Mg и ^{24}Na , а также ^{137}Cs . Напряжение на ФЭУ — 850 В (1) и 1200 В (2)

Следующим этапом при подготовке детектора к измерениям в поле излучения нейтронного генератора стала калибровка энергетической шкалы детектора. Интересующий нас диапазон энергий можно «покрыть» пиками γ -излучения, возникающими при облучении образца высокочистого алюминия ДТ-нейтронами (см. рис. 3, а). Нарбатываемые в специальном калибровочном образце изотопы ^{27}Mg и ^{24}Na дают 4 наиболее наблюдаемые линии — 844 кэВ (71,8%) и 1015 кэВ (28,2%) от магния и 1369 кэВ (99,99%) и 2754 кэВ (99,85%) от натрия-24. Дополнительно для построения калибровочной прямой также используются пики вылета одиночного и парного аннигиляционных квантов (SE — single escape peak, DE — double escape peak).

Форма амплитудного спектра собственного фона детектора (рис. 5) оказалась в значительной мере схожей со спектрами, полученными для других кристаллов семейства галогенидов лантана [4]. Большая интенсивность α -излучения собственного фона позволяет говорить об увеличенной концентрации примесного изотопа ^{227}Ac

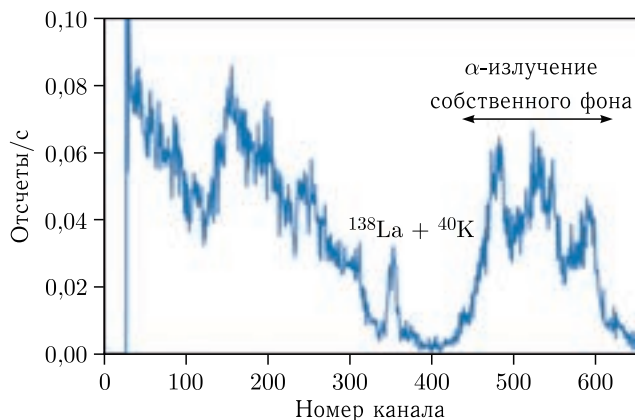


Рис. 5. Измеренный амплитудный спектр собственного фона кристалла

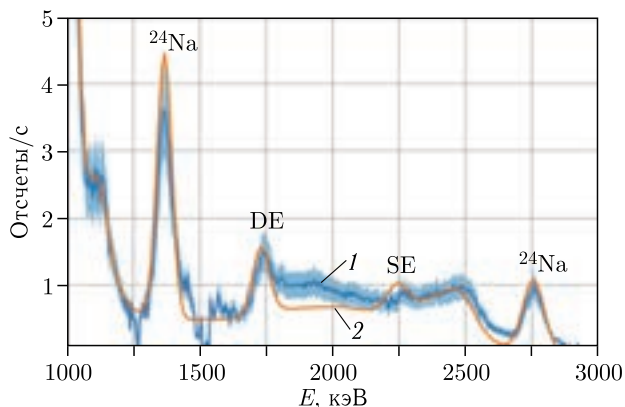


Рис. 6 (цветной в электронной версии). Амплитудный спектр (1) детектора от источника ^{24}Na и GEANT4-модель (2). Напряжение на ФЭУ — 850 В

в исследуемом кристалле. Отношение α/β , полученное при исследовании собственного фона кристалла, лежало в диапазоне $0,3 \sim 0,4$, что также соответствует результатам работы [4].

На рис. 6 представлены в сравнении измеренный амплитудный спектр сцинтилляционного детектора и модельный отклик, полученный с помощью ПО GEANT4 [5].

В ходе эксперимента был замечен рост собственного фона кристалла в результате его активации быстрыми нейтронами. Количество таких событий в секунду в амплитудном спектре детектора недостаточно велико (~ 30 отсчетов/с), чтобы быть значимым в экспериментах с высокой плотностью потока нейтронов, и, как следствие, этим эффектом можно пренебречь при работе в сильном поле излучения нейтронного генератора.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

С использованием программного обеспечения GEANT4 и библиотеки сечений ENDF 8.0 [3] проведено предварительное моделирование отклика сцинтилляционного детектора на основе кристалла $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ на DD-нейтроны. На рис. 7 представлены

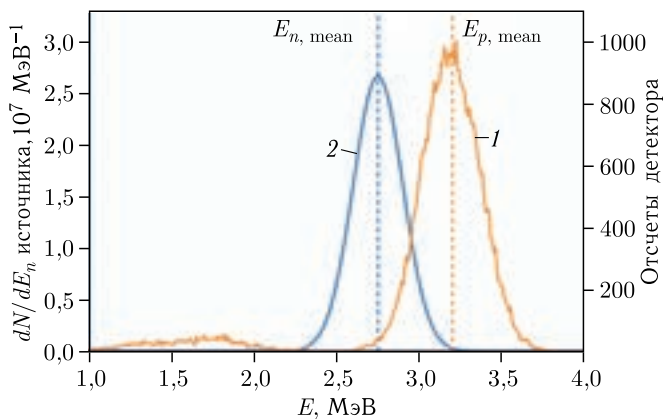


Рис. 7. Полученное с помощью ПО GEANT4 нормированное групповое распределение протонов (1) и исходное модельное распределение DD-нейтронов по энергиям (2)

полученные в результате расчета нормированные групповые распределения протонов, образовавшихся в объеме кристалла в реакциях $^{35}\text{Cl}(n, p)$.

В качестве модельного энергетического распределения налетающих нейтронов было использовано распределение Гаусса со средним значением $E_{n,\text{mean}} = 2,75$ МэВ и уширением 150 кэВ (см. рис. 7), что соответствует рассчитанному с помощью SRIM и MCNP энергетическому спектру нейтронов в поле излучения нейтронного генератора ИНГ-07Д, проиллюстрированному на рис. 8.

Реакция $^{35}\text{Cl}(n, p)^{35}\text{S}$ с образованием ядра серы в основном состоянии протекает с выделением энергии, $Q \approx 0,615$ МэВ, что и приводит к соответствующему увеличению энергии продуктов реакции. Следует отметить, что для нейтрона с энергией 2,75 МэВ при различных углах вылета относительно скорости центра масс энергия образовавшегося в (n, p) -реакции протона будет варьироваться в пределах от 3,03 до 3,36 МэВ, со средним значением $\sim 3,2$ МэВ, что как раз соответствует расчетному значению $E_{p,\text{mean}}$ на рис. 7.

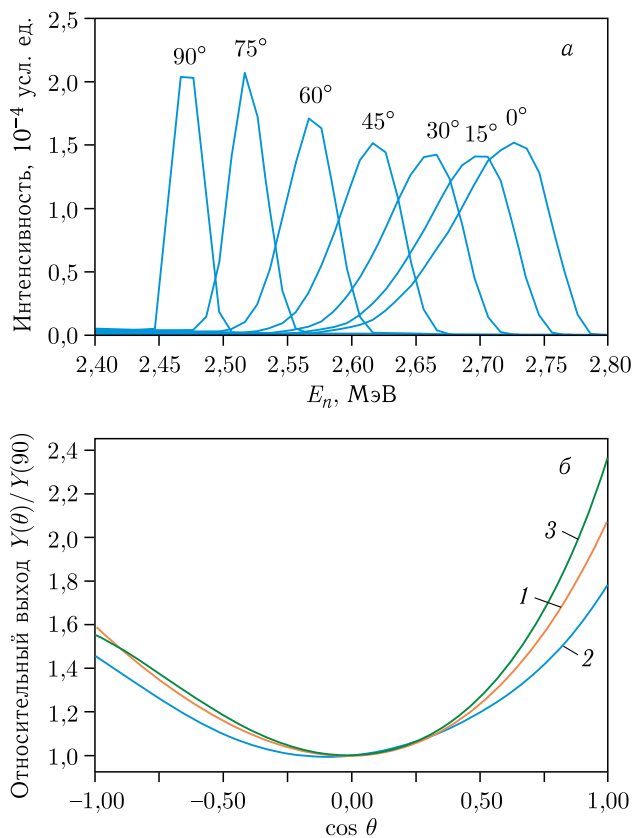


Рис. 8 (цветной в электронной версии). а) Распределение нейтронов по энергиям в зависимости от угла выхода, отсчитанного от оси нейтронного генератора; б) распределение относительного выхода нейтронного генератора применительно к косинусу угла выхода: 1 — результат использованной в расчетах модели для случая 75 кэВ энергии налетающих ионов; 2 и 3 — табличные данные для случая 50 и 100 кэВ соответственно

По результатам оценок можно утверждать, что при достаточно низком уровне сопутствующего γ -излучения (или хорошем разделении p/γ по форме импульсов) становится возможным измерение потока и спектрометрия DD-нейтронов для целей диагностики дейтериевой плазмы или контроля выхода DD-нейтронных генераторов.

Отдельной задачей будущих исследований является определение критического значения соотношения потоков DD- и DT-нейтронов, при котором регистрация DD-нейтронов данным кристаллом перестает давать полезную информацию.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ В ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ НЕЙТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Исследование амплитудного спектра сцинтилляционного спектрометра на основе кристалла $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ при регистрации DD-нейтронов проводилось в поле излучения нейтронного генератора (НГ). В эксперименте использован нейтронный генератор на газонаполненной нейтронной трубке ИНГ-07Д, в ходе экспозиции ток трубки поддерживался на уровне 0,3 мА, ускоряющее напряжение — 150 кВ. Выход этого генератора контролировался с помощью штатного монитора нейтронного потока на основе ^3He -счетчика и в эксперименте составлял в среднем $\sim 1 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$. Для снижения количества отсчетов, связанных с регистрацией фонового γ -излучения, испускаемого-

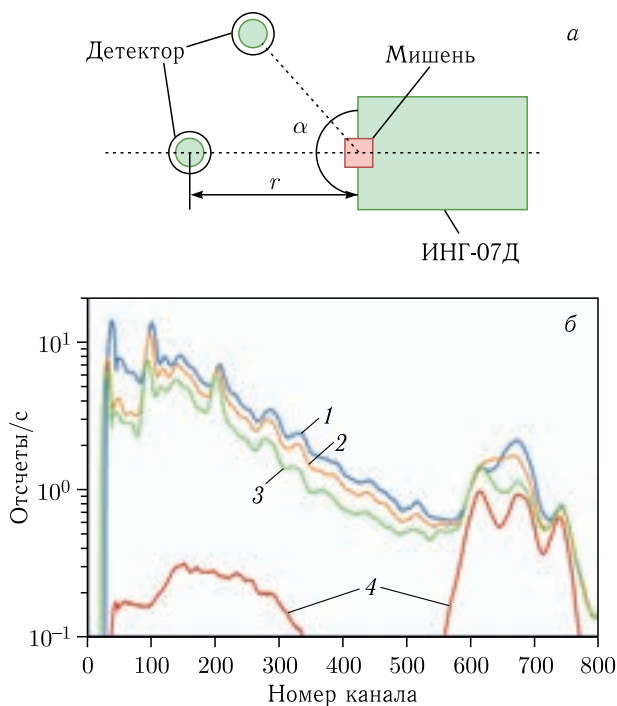


Рис. 9 (цветной в электронной версии). а) Геометрическая схема эксперимента. Величина $r = 35 \text{ см}$, α — от 0 до 90° . б) Отклик $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ -детектора в поле излучения нейтронного генератора ИНГ-07Д при 0 (1), 45 (2) и 75° (3) отклонения от оси генератора и отклик на собственное излучение (4)

го нейтронным генератором и окружающими конструкциями, детектор помещался в дополнительный слой защиты ~ 5 мм свинца. Геометрическая схема экспериментального стенда представлена на рис. 9. Полученный в этом эксперименте амплитудный спектр детектора приведен на рис. 9.

На представленных выше откликах каналы от 600 до 750 определяют область интереса — часть отклика, предположительно вызванного рожденными в (n, p) -реакции протонами. В рамках этого предположения была проведена серия измерений при разных расстояниях от центра мишени НГ до центра кристалла при его расположении на оси генератора. Зависимость интегрального количества отсчетов по выбранному региону интереса от $1/r^2$ оказалась линейной с хорошей точностью. Это косвенно указывает на связь между потоком DD-нейтронов в месте расположения детектора и количеством отсчетов в интересующей нас части отклика детектора.

Подтверждением гипотезы, что наблюдаемый в зоне интереса пик вызван именно протонами, рожденными в (n, p) -реакции на хлоре, являются сравнительные измерения отклика детектора при разных его положениях относительно оси нейтронного генератора, угла α на рис. 10. Для получения энергетических распределений, представленных на рис. 10, из полных откликов детектора под нейтронным генератором был вычтен отклик детектора на собственное излучение.

Средняя энергия в энергетическом распределении нейтронов, вылетающих вдоль оси генератора, — $E_{n,\text{mean}} \approx 2,73$ МэВ, при $\alpha = 60^\circ$ — $E_{n,\text{mean}} \approx 2,62$ МэВ. Смещение пика в сторону меньшей энергии на рис. 9 свидетельствует о том, что этот пик является результатом регистрации протонов, возникших в результате (n, p) -реакции на ядре ^{35}Cl . Следовательно, наличие данного пика в отклике сцинтиллятора позволяет мониторировать поток нейтронов в поле излучения ИНГ-07Д, а также анализировать распределение потока нейтронов по энергиям.

С использованием модельных энергетических распределений нейтронов на выходе из мишени генератора удалось получить оценочную калибровочную зависимость детектора от энергии нейтронов. Калибровочная прямая представлена на рис. 11. Отклонение точки «0°» от линейной зависимости предположительно объясняется расхожде-

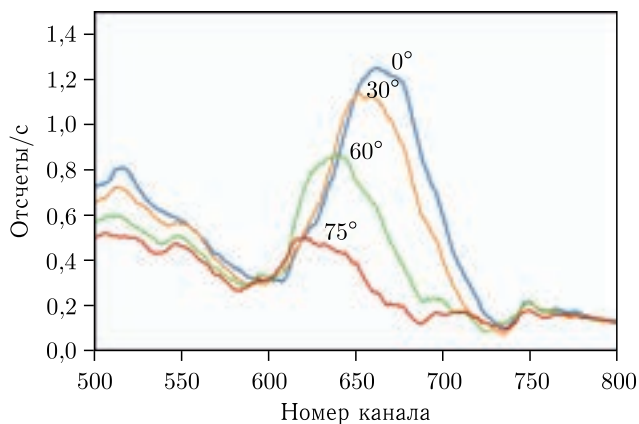


Рис. 10. Формы пика в амплитудном спектре сцинтилляционного детектора на основе кристалла $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ для нескольких значений угла α

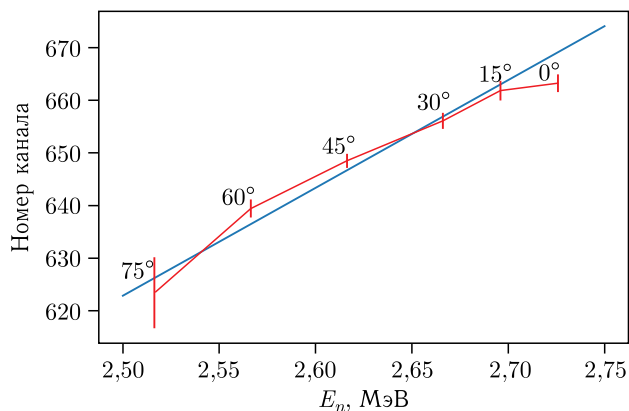


Рис. 11. Калибровочная прямая зависимости номера канала от энергии регистрируемого детектором нейтрона

нием теоретического и реального положения детектора относительно оси нейтронного генератора согласно системе позиционирования.

Показано, что зависимость регистрируемой энергии от энергии налетающего нейтрона линейна с учетом погрешности в диапазоне от 2,5 до 2,75 МэВ, что коррелирует с результатами для другого хлорсодержащего сцинтиллятора CLYC, полученными для нейтронов с энергиями в диапазоне от 1,9 до 3,8 МэВ [2].

Дальнейший анализ сигнала по форме импульса и разделению импульсов, соответствующих налетающим нейтронам и γ , позволят провести более детальный анализ распределения потока налетающих нейтронов по энергиям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен развернутый анализ отклика сцинтилляционного детектора на основе кристалла $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ на калибровочные источники, собственное излучение и в поле излучения нейтронного генератора ИНГ-07Д.

Подобраны оптимальные параметры работы экспериментальной сборки в условиях смешанных потоков n - и γ -излучения. Исследовано влияние собственного излучения на отклик детектора. Проведен анализ работы детектора в потоке DD-нейтронов. Показана возможность использования детектора в качестве регистратора быстрых DD-нейтронов.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 26.12.2018 № Н.4а.241.19.19.1009 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2019 г.».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Knoll G.G.* Radiation Detection and Measurement. 4th ed. 2010.
2. *Giaz A., Blasi N., Boiano C., Brambilla S., Camera F., Cattadori C., Ceruti S., Gramegna F., Marchi T., Mattei I., Mentana A., Million B., Pellegri L., Rebai M., Riboldi S., Salamida F.,*

- Tardocchi M.* Fast Neutron Measurements with ^7Li and ^6Li Enriched CLYC Scintillators // Nucl. Instr. Meth. A. 2016. V. 825. P. 51.
3. *Brown D.A., Chadwick M.B., Capote R., Kahler A.C., Trkov A., Herman M.W., Sonzogni A.A., Danon Y., Carlson A.D., Dunn M., Smith D.L., Hale G.M., Arbanas G., Arcilla R., Bates C.R., Beck B., Becker B., Brown F., Casperson R.J., Conlin J., Cullen D.E., Descalle M.-A., Firestone R., Gaines T., Guber K.H., Hawari A.I., Holmes J., Johnson T.D., Kawano T., Kiedrowski B.C., Koning A.J., Kopecky S., Leal L., Lestone J.P., Lubitz C., Marquez Damian J.I., Mattoon C.M., McCutchan E.A., Mughabghab S., Navratil P., Neudecker D., Nobre G.P.A., Noguere G., Paris M., Pigni M.T., Plompen A.J., Pritychenko B., Pronyaev V.G., Roubtsov D., Rochman D., Romano P., Schillebeeckx P., Simakov S., Sin M., Sirakov I., Sleaford B., Sobes V., Soukhovitskii E.S., Stetcu I., Talou P., Thompson I., van der Marck S., Welser-Sherrill L., Wiarda D., White M., Wormald J.L., Wright R.Q., Zerkle M., Zverovnik G., Zhu Y.* ENDF/B-VIII.0: The 8th Major Release of the Nuclear Reaction Data Library with CIELO-Project Cross Sections, New Standards and Thermal Scattering Data // Nucl. Data Sheets. 2018. V. 148. P. 1–142.
 4. *Wolszczak W., Dorenbos P.* Shape of Intrinsic Alpha Pulse Height Spectra in Lanthanide Halide Scintillators // Nucl. Instr. Meth. A. 2017. V. 857. P. 66–74.
 5. *Allison J., Amako K., Apostolakis J., Arce P., Asai M., Aso T., Bagli E., Bagulya A., Banerjee S., Barrand G., Beck B.R., Bogdanov A.G., Brandt D., Brown J.M.C., Burkhardt H., Canal Ph., Cano-Ott D., Chauvie S., Cho K., Cirrone G.A.P., Cooperman G., Cortes-Giraldo M.A., Cosmo G., Cuttone G., Depaola G., Desorgher L., Dong X., Dotti A., Elvira V.D., Folger G., Francis Z., Galoyan A., Garnier L., Gayer M., Genser K.L., Grichine V.M., Guatelli S., Gueye P., Gumplinger P., Howard A.S., Hrivnacova I., Hwang S., Incerti S., Ivanchenko A., Ivanchenko V.N., Jones F.W., Jun S.Y., Kaitaniemi P., Karakatsanis N., Karamitros M., Kelsey M., Kimura A., Koi T., Kurashige H., Lechner A., Lee S.B., Longo F., Maire M., Mancusi D., Mantero A., Mendoza E., Morgan B., Murakami K., Nikitina T., Pandola L., Paprocki P., Perl J., Petrovic I., Pia M.G., Pokorski W., Quesada J.M., Raine M., Reis M.A., Ribon A., Ristic Fira A., Romano F., Russo G., Santin G., Sasaki T., Sawkey D., Shin J.I., Strakovsky I.I., Taborda A., Tanaka S., Tome B., Toshito T., Tran H.N., Truscott P.R., Urban L., Uzhinsky V., Verbeke J.M., Verderi M., Wendt B.L., Wenzel H., Wright D.H., Wright D.M., Yamashita T., Yarba J., Yoshida H.* Recent Developments in GEANT4 // Nucl. Instr. Meth. A. 2016. V. 835. P. 186–225.

Получено 16 июня 2020 г.