

## НЕЙТРОННЫЙ МОДУЛЬ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ АНТИНЕЙТРИНО ПО РЕАКЦИИ ОБРАТНОГО БЕТА-РАСПАДА

*Д. М. Громушкин*\*, *А. Н. Дмитриева*, *А. Ю. Коновалова*,  
*А. А. Луковников*, *Е. С. Моргунов*, *Е. П. Хомчук*,  
*С. С. Хохлов*, *И. А. Шульженко*

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

Для регистрации реакторных антинейтрино можно использовать реакцию их взаимодействия с протоном (обратный бета-распад). В результате реакции обратного бета-распада образуются нейтрон и позитрон. Позитрон может регистрироваться пластиковым сцинтиллятором, а нейтрон — сцинтиллятором на основе ZnS(Ag) с добавлением захватчика нейтронов  ${}^6\text{Li}$  или  ${}^{10}\text{B}$ . В НИЯУ МИФИ разрабатывается нейтронный модуль для твердотельного нейтринного детектора. Приводятся результаты тестирования такого модуля, изготовленного на основе сцинтилляционной композиции ЛРБ-2 ( $\text{ZnS(Ag)} + \text{B}_2\text{O}_3$ ).

To detect reactor antineutrinos, the reaction of their interaction with a proton (inverse beta decay) can be used. As a result of inverse beta decay reaction, a neutron and a positron are produced. A positron can be detected with a plastic scintillator. To detect a neutron, a scintillator based on ZnS(Ag) with the addition of a neutron capturer  ${}^6\text{Li}$  or  ${}^{10}\text{B}$  can be used. A neutron module for a solid-state neutrino detector is being developed at MEPHI. The results of testing such a module produced on the basis of the scintillation composition LRB-2 ( $\text{ZnS(Ag)} + \text{B}_2\text{O}_3$ ) are presented.

PACS: 29.40.Mc; 29.40.—n

### ВВЕДЕНИЕ

В процессе работы ядерного реактора при делении изотопов урана и плутония образуются нейтроноизбыточные ядра, которые претерпевают цепочку бета-распадов до образования стабильных ядер-изобар. В каждом акте бета-распада испускается антинейтрино. Так, например, величина потока антинейтрино, генерируемого в процессе работы реактора ВВЭР-1000, превышает  $10^{20} \text{ c}^{-1}$ .

Нейтринное излучение, обладая высокой проникающей способностью, свободно проходит сквозь биологическую защиту и конструкционные материалы реактора и может регистрироваться за пределами активной

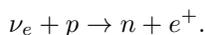
---

\* E-mail: DMGromuskin@mephi.ru

зоны. Таким образом, использование энергетических ядерных реакторов как источников антинейтрино позволяет проводить исследование осцилляций нейтрино как на малых (10–20 м), так и на больших (несколько километров) расстояниях от активной зоны реактора, проводить измерение магнитного момента электронного антинейтрино и исследовать процессы когерентного рассеяния нейтрино на ядрах [1]. Помимо фундаментальных исследований, измерение характеристик потока антинейтрино от реактора позволяет решать прикладные проблемы, такие как задачи нераспространения делящихся материалов, контроль тепловой мощности реактора и исследование процессов выгорания существующих и новых видов топлива.

Для успешного развития нейтринного метода контроля реакторов необходимо с высокой статистической достоверностью регистрировать поток антинейтрино, выходящий из активной зоны реактора, а также измерять его спектр. Для этого необходим компактный инструмент, имеющий высокую эффективность регистрации антинейтрино и обладающий хорошим энергетическим разрешением. Однако на сегодняшний день полноценной промышленной версии детектора для мониторинга ядерных реакторов нейтринным методом еще не существует, и создание такого детектора является весьма актуальной задачей.

На практике наиболее удобной для регистрации реакторных антинейтрино является реакция обратного бета-распада нейтрона, впервые примененная в исторических реакторных экспериментах Ф. Райнеса [2]:



Данная реакция имеет пороговый характер и возможна для электронных антинейтрино с энергией более 1,806 МэВ. Таким образом, регистрация антинейтрино может проводиться водородсодержащим детектором, способным регистрировать родившиеся в реакции позитрон и нейтрон.

За счет ионизации позитрон в течение нескольких наносекунд теряет свою энергию и аннигилирует в веществе детектора с излучением двух (трех) гамма-квантов с общей энергией 1,022 МэВ.

Характерная энергия нейтрона составляет 5–20 кэВ. В течение десятков микросекунд нейтрон замедляется в веществе детектора до тепловых энергий, после чего может быть зарегистрирован. Для регистрации тепловых нейтронов могут применяться материалы, содержащие ядра, обладающие высоким сечением захвата ( $^3\text{He}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^{10}\text{B}$ ,  $^{113}\text{Cd}$ ,  $^{155}\text{Gd}$ ,  $^{157}\text{Gd}$ ) и испускающие после захвата вторичные легкие ядра или гамма-кванты.

Поскольку для термализации и дальнейшего захвата нейтрона требуется некоторое время, полезным событием в детекторе антинейтрино считается задержанное совпадение сигнала от регистрации позитрона с сигналом от регистрации теплового нейтрона.

Известно более десятка детекторов антинейтрино, основанных на реакции обратного бета-распада: Double Chooz [3], iDREAM [4], Neutrino-4 [5], DANSS [6], PROSPECT [7] и PROSPECT-II [8], Daya

Bay [9], CHANDLER [10], RENO [11], NEOS [12] и NEOS-II [13], Nucifer [14], NuLat [15], JUNO-TAO [16] и др.

Тем не менее на сегодняшний день проблема спектрометрии реакторных антинейтрино с использованием подобных детекторов остается нерешенной. В последнее время предпочтение отдается детекторам, в которых захват нейтрона происходит в реакции с изотопом  ${}^6\text{Li}$ , а образовавшаяся при этом альфа-частица имеет малый пробег в мишени, что позволяет довольно точно определить местонахождение области захвата нейтрона.

Регистрация реакторных антинейтрино может осуществляться с помощью детектора на основе комбинированных модулей. Данный модуль (рис. 1) включает два измерительных элемента: пластиковый сцинтиллятор в форме прямоугольного параллелепипеда для регистрации позитрона, окруженный слоем неорганического сцинтиллятора  $\text{ZnS}(\text{Ag})$  с добавкой  ${}^6\text{Li}$  или  ${}^{10}\text{B}$  для детектирования нейтронов. При этом для позитронов и нейтронов используются отдельные системы регистрации. Съем светового сигнала, обусловленного попаданием позитрона, проводится с торцов пластикового сцинтиллятора через светособирающие конусы, к которым прижимаются катоды вакуумных фотоэлектронных умножителей (разрабатывается группой под руководством М. Д. Скорохватова). Светособирающие конусы изготовлены из полистирола, не имеющего сцинтилляционных добавок, чтобы исключить сцинтилляционные вспыш-

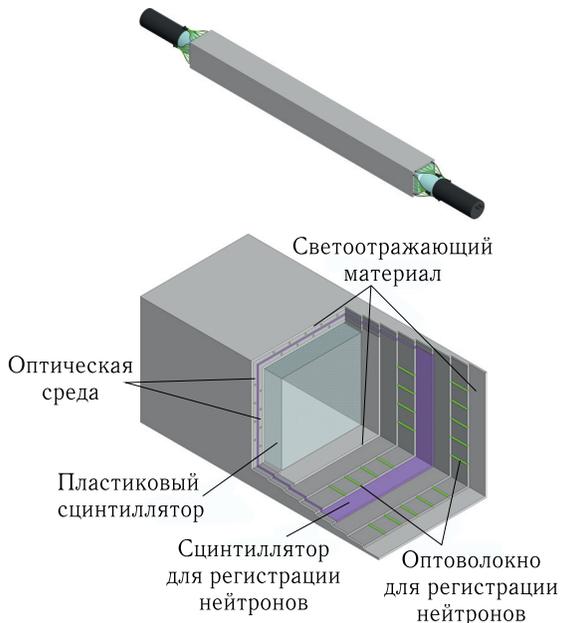
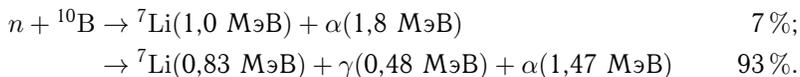


Рис. 1. Модель и структура комбинированного модуля для нейтринного детектора

ки от фоновых бета-распадов в стеклах входных окон фотоумножителей. Регистрация светового сигнала, вызванного захватом нейтрона в неорганическом сцинтилляторе, осуществляется с помощью вакуумных (ФЭУ) или кремниевых (SiPM) фотоэлектронных умножителей, расположенных с торцов модуля, через оптическое волокно, находящееся в оптическом контакте со сцинтиллятором. Размеры модуля составляют  $1000 \times 50 \times 50$  мм.

При этом для регистрации нейтронов предпочтительно использовать сцинтиллятор  $ZnS(Ag)$  с добавлением  ${}^6Li$ , так как по сравнению с  ${}^{10}B$  он имеет в два раза большую энергию вторичных частиц и, соответственно, большее число фотонов сцинтилляции ( $\sim 160\,000$ ) на один захват нейтрона. Основными производителями подобных сцинтилляторов являются Eljen Technology [17] и Saint-Gobain Crystals [18]. Однако в настоящее время поставки импортных сцинтилляторов для регистрации нейтронов ограничены. Поскольку в России не развито производство сцинтилляторов на основе  ${}^6Li$ , в данной работе была изучена возможность применения сцинтилляционной композиции  $ZnS(Ag) + B_2O_3$  отечественного производства (ЛРБ-2 [19], ЗАО «НПФ «Люминофор»). Композиция поставляется в виде порошка с размером гранул от 300 до 800 мкм, что позволяет создавать сцинтилляционные слои различных конфигураций. Регистрация тепловых нейтронов в данной композиции происходит посредством изотопа  ${}^{10}B$ , который присутствует в естественном боре (19,8%), по следующим реакциям:



Следует отметить следующие важные особенности этой сцинтилляционной композиции:

- максимум спектра излучения составляет 450 нм, что соответствует максимуму спектральной чувствительности большого числа моделей фотоумножителей;
- наличие медленной компоненты высвечивания позволяет проводить отбор сигналов, вызванных захватом нейтронов, по форме импульса;
- порошковая форма выпуска обеспечивает возможность изготовления сцинтилляторов большой площади;
- наличие низкой чувствительности к релятивистским заряженным частицам обеспечивает хорошее подавление вклада от частиц фона естественного излучения.

Данная сцинтилляционная композиция получила распространение в установках для регистрации широких атмосферных ливней [20, 21] и регистрации фонового потока вблизи поверхности Земли [22, 23]. Эффективность регистрации тепловых нейтронов детекторами, используемыми в данных установках, составляет 5–15% в зависимости от условий регистрации и конструкции светособирающей системы детектора.

## ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ НЕЙТРОННОГО МОДУЛЯ

Чаще всего при использовании сцинтилляторов на основе  $ZnS(Ag)$  с добавлением  ${}^6LiF$  или  $B_2O_3$  фотоприемники размещаются либо вплотную к поверхности сцинтиллятора, либо через светособирающие системы на основе конических или призмовидных элементов, фокусирующих свет на входное окно. В нашем случае ни один из указанных выше вариантов не может быть использован ввиду необходимости создания плоского сцинтиллятора толщиной не более 10 мм с хорошей однородностью светосбора. Поэтому была разработана система светосбора на основе переизлучающего оптоволокна Kuraray Y11-200 [24], помещенного в оптическую среду из компаунда ELASTOSIL RT 601 [25], находящаяся в оптическом контакте с поверхностью сцинтиллятора. В качестве отражающего покрытия используется материал Tyvek [26], обернутый вокруг всей сборки.

Для выбора оптимального числа оптических волокон в программном пакете Geant4 [27] была создана модель нейтронного модуля с одним слоем сцинтиллятора и одним слоем компаунда. В модели учтены реальные размеры, химический состав и плотности отдельных компонентов модуля, заложены оптические свойства компаунда и оптоволокна, заданы оптические поверхности с диффузным отражением света от покрытия и от сцинтиллятора. Для выбранного расстояния от торца модуля (от 5 до 65 см с шагом 5 см) на поверхности сцинтиллятора равномерно по ширине модуля разыгрывалась точка, из которой в компаунд равномерно в верхнюю полусферу запускались 40 тыс. фотонов с энергией, равномерно разыгранной в диапазоне излучения сцинтиллятора от 2,1 до 2,7 эВ (на один захваченный нейтрон в телесном угле 4π в среднем излучается ~ 80 тыс. фотонов). На торцах оптических волокон слева и справа располагались чувствительные объемы. После попадания фотона в такой объем его дальнейшее моделирование прекращалось. При этом проводился подсчет числа фотонов, попавших в каждый чувствительный объем. Таким образом определялось число фотонов, достигших левого или правого фотоприемника. Зависимость числа зарегистрированных фотонов от расстояния между торцом модуля и точкой запуска фотонов для вариантов, отличающихся числом оптических волокон, представлена на рис. 2, сверху. Как видно из графика, увеличение числа оптических волокон с 3 до 9 приводит к увеличению числа регистрируемых фотонов в два раза. При увеличении числа волокон с 9 до 15 число регистрируемых фотонов растет всего на 25%. Для минимизации числа используемых волокон (поставки оптоволокна Kuraray Y11-200 в РФ на сегодняшний день ограничены) был выбран вариант с 9 оптическими волокнами в одном светособирающем слое. Помимо этого, применение 9 волокон позволяет в дальнейшем использовать в качестве фотоприемников SiPM с размером чувствительной области 3 × 3 мм.

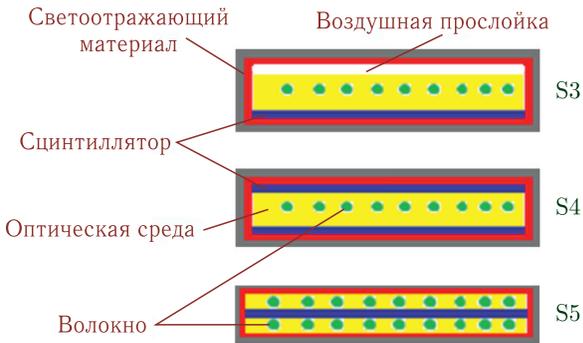
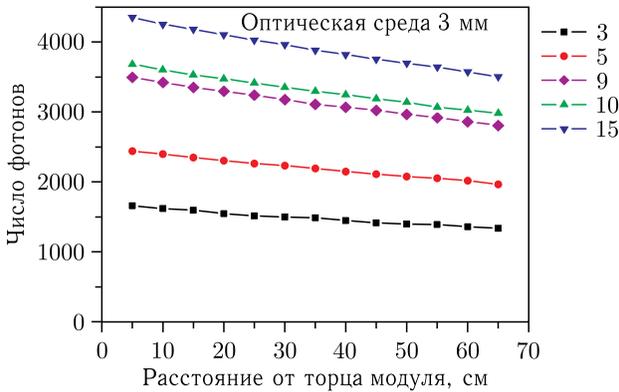


Рис. 2. Зависимости числа фотонов, достигающих входного окна фотоприемника, от расстояния до фотоприемника для различного числа оптических волокон в светособирающем слое, полученные по результатам модельных расчетов в Geant4 (сверху), и схемы тестовых образцов нейтронного модуля (снизу)

Для выбора оптимальной конструкции нейтронного модуля было изготовлено несколько тестовых образцов. Схемы трех из них приведены на рис. 2, снизу:

- образец S3 имеет один сцинтилляционный и один светособирающий слой;
- образец S4 состоит из двух слоев сцинтиллятора, между которыми размещен светособирающий слой;
- образец S5 имеет один сцинтилляционный слой, размещенный между двумя светособирающими слоями.

Толщина сцинтилляционных слоев из композиции ЛРБ-2 во всех образцах составляет  $50 \text{ мг/см}^2$ . Геометрические размеры сцинтилляционных слоев составляют  $700 \times 50 \times 5 \text{ мм}$ . Внешний корпус изготовлен из листового алюминия толщиной  $1,2 \text{ мм}$ . Все 9 оптических волокон с обоих торцов модуля собираются в жгуты и вклеиваются в оптические разъемы.

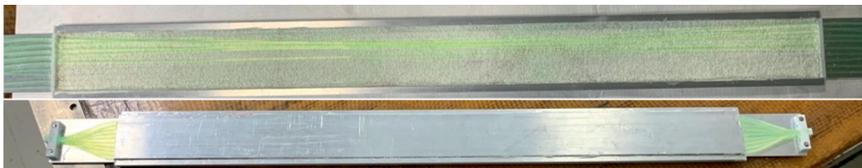


Рис. 3. Модуль S5 на этапе протяжки оптоволоконка (сверху) и на стадии полной готовности (снизу)

Для уменьшения потерь света в месте прилегания торцов волокон к входному окну фотоприемника проводится их полировка, а при установке используется оптическая смазка. На рис. 3 представлены фотографии собранного нейтронного модуля.

### СТЕНД ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ И МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРОНОВ

Исследование характеристик нейтронного модуля проводилось на стенде, схема которого представлена на рис. 4. В качестве фотоприемников использовались ФЭУ-85-БХ № 145 (канал 1) и № 306 (канал 2). Для оцифровки сигналов с ФЭУ использовался биполярный 12-битный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с диапазоном от  $-3,5$  до  $+3,5$  В и частотой дискретизации 100 МГц (ООО «Высокие технологии СК»), подключенный к персональному компьютеру (ПК), осуществляющему считывание и обработку информации. Для увеличения потока нейтронов использовался паспортизированный источник нейтронного излучения  $^{252}\text{Cf}$  (NCf2.82, поток нейтронов с энергией с 2,12 МэВ в 4π ср  $\sim 9,6 \times 10^2$  с $^{-1}$ , поверка от 18.08.2023), для термализации быстрых нейтронов ( $n_6$ ) до тепловых энергий ( $n_T$ ) источник помещен в оболочку из замедлителя на основе полистирола с размерами 20 × 20 × 20 см. В качестве триггерного условия использовалось одновременное срабатывание двух фотоприемников с амплитудой сигнала более 10 мВ.

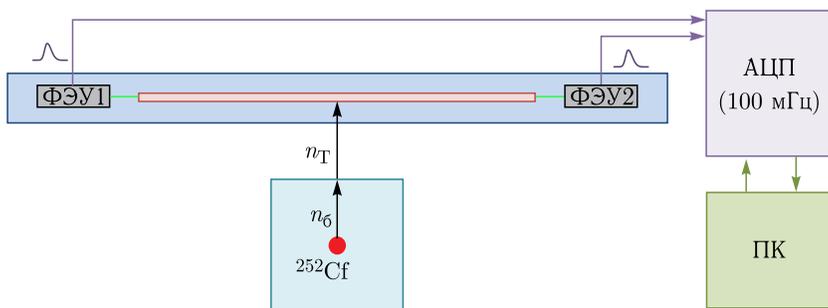


Рис. 4. Схема стенда для исследования тестовых образцов нейтронного модуля

Осциллограммы сигналов, вызванных захватом нейтрона в сцинтилляторе и попаданием в него легких заряженных частиц, отличаются друг от друга (рис. 5). Частицы  $\alpha$  и ядра  ${}^7\text{Li}$ , которые образуются при захвате нейтрона, в  $\text{ZnS}(\text{Ag})$  имеют небольшие пробеги и, следовательно, теряют в нем всю энергию. В результате происходит длительное высвечивание сцинтиллятора ( $\sim 10$  мкс, медленная компонента). При этом длительность высвечивания от легких заряженных частиц не превышает сотен наносекунд. Данное отличие во времени высвечивания при регистрации заряженных частиц и нейтронов позволяет проводить идентификацию (разделение) сигналов. Для отделения сигналов, вызванных захватом нейтронов ( $n$ ), от электронов и гамма-квантов ( $e - \gamma$ ) применялась методика, в которой в качестве критерия для разделения используется безразмерный параметр  $D$  [28]. В осциллограмме сигнала выделяется некоторый интервал, включающий только медленную компоненту, по которому проводится вычисление величины параметра  $D$  как натурального

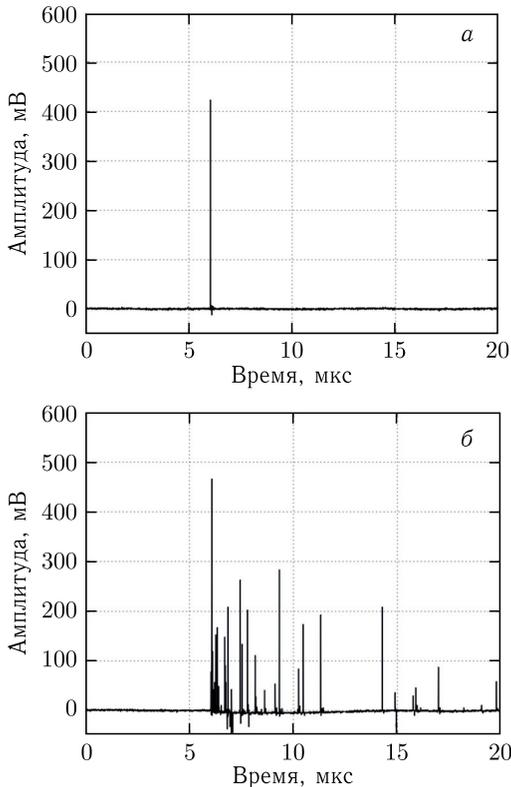


Рис. 5. Осциллограммы сигналов от заряженных частиц (а) и нейтрона (б)

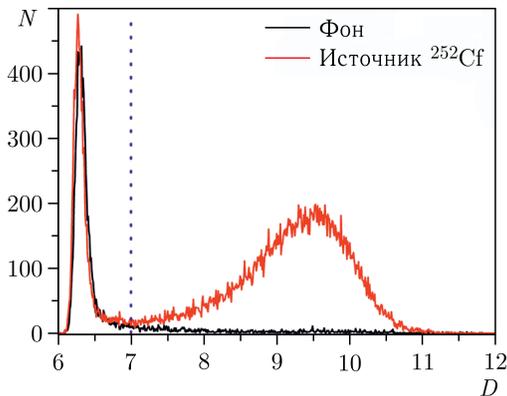


Рис. 6. Распределения сигналов по величине параметра  $D$ , полученные при измерениях с источником нейтронов и без него

логарифма суммы квадратов амплитуд:

$$D = \ln \left( \sum_{n=t_{\text{tail}_1}}^{t_{\text{tail}_2}} A_n^2 \right), \quad (1)$$

где  $t_{\text{tail}_1}$ ,  $t_{\text{tail}_2}$  — границы интервалов;  $A_n$  — значение сигнала в  $n$ -й точке осциллограммы.

Примеры распределений зарегистрированных сигналов по величине параметра  $D$ , полученных при измерениях с источником нейтронов и без него (для первого канала), представлены на рис. 6. Распределения для второго канала имеют аналогичный вид. В распределении, полученном при измерении с источником, наблюдается пик от заряженных частиц (рис. 6, *a*) и нейтронов (рис. 6, *б*). В качестве критерия разделения сигналов от нейтронов и заряженных частиц выбирается значение параметра  $D = 7$ , соответствующее локальному минимуму этого распределения в межпиковой области.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МОДУЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

С помощью описанного выше стенда были получены распределения сигналов по параметру  $D$  для трех созданных тестовых образцов нейтронных модулей (рис. 7). Распределения приведены для десятичасовых наборов данных с использованием источника нейтронного излучения и двух регистрирующих каналов. Видно, что для всех тестовых образцов наблюдается хорошее разделение сигналов от заряженных частиц и нейтронов.

Так как параметр  $D$  связан с числом фотонов медленной компоненты свечивания сцинтиллятора, попавших на фотоприемник, он может быть использован для определения образца, имеющего наилучший светосбор. Таким является образец S5 с одним сцинтилляционным и двумя светособирающими слоями.

Еще одной важной характеристикой нейтронного модуля является эффективность регистрации нейтронов. Для оценки относительной эффективности регистрации нейтронов с использованием стенда и источника нейтронного излучения для каждого образца проведены наборы данных. Вначале 2 ч 30 мин измерялся нейтронный фон. После устанавливался источник нейтронного излучения в пластиковом замедлителе, и измерение проводилось еще 2 ч 30 мин. Из распределений по величине параметра  $D$  (см. рис. 7) для каждого образца и каждого регистрирующего канала в отдельности были определены критерии отбора нейтронов  $D_1$  и  $D_2$  (табл. 1). Сигнал с модуля считался нейтронным ( $n$ ) в том случае, если совпавшие сигналы с обоих регистрирующих каналов превышали значения  $D_1$  и  $D_2$ . В противном случае сигнал считался фоновым событи-

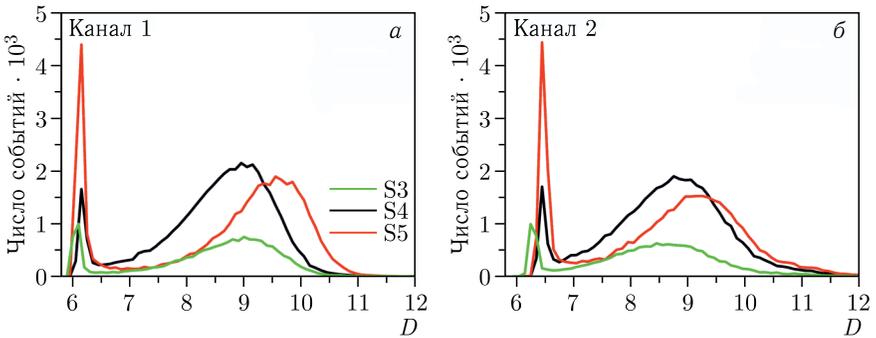


Рис. 7. Распределения по величине параметра  $D$ , полученные для образцов S3, S4 и S5

Таблица 1. Скорости счета нейтронов и заряженных частиц тестовых образцов нейтронных модулей при измерениях с источником нейтронов и без него.  $D_1$  и  $D_2$  — значения критерия отбора для канала 1 и канала 2

Модуль	Источник $^{252}\text{Cf}$	$D_1$	$D_2$	$N_n, \text{c}^{-1}$	$N_{\gamma,e}, \text{c}^{-1}$
S3	—	6,4	6,6	$0,03 \pm 0,01$	$0,14 \pm 0,04$
	+			$1,22 \pm 0,15$	$0,16 \pm 0,05$
S4	—	6,7	6,8	$0,05 \pm 0,02$	$0,17 \pm 0,05$
	+			$3,63 \pm 0,23$	$0,24 \pm 0,06$
S5	—	7,0	7,0	$0,05 \pm 0,02$	$0,59 \pm 0,08$
	+			$2,94 \pm 0,23$	$0,70 \pm 0,11$

ем, к которым относятся в основном групповые прохождения заряженных частиц ( $\gamma, e$ ) от ШАЛ. На рис. 8 представлены графики скоростей счета тестовых образцов при измерениях с источником нейтронов и без него. Видно, что в момент установки источника у всех модулей наблюдается резкое увеличение скорости счета нейтронов. Скорости счета нейтронов ( $N_n$ ) и заряженных частиц ( $N_{\gamma,e}$ ) модулем при измерениях с источником нейтронов и без него представлены в табл. 1.

Наибольшую скорость счета в измерениях с источником нейтронного излучения показал образец S4. Скорость счета образца S5 оказалась на 20% меньше, чем у S4, а у S3 — в три раза меньше. Скорость счета не нейтронных сигналов при установке источника практически не меняется, что свидетельствует о корректности выбора критериев для разделения сигналов. Небольшое увеличение значений связано с сигналами в припороговой области по величине параметра  $D$ , в которой четкая идентификация является невозможной.

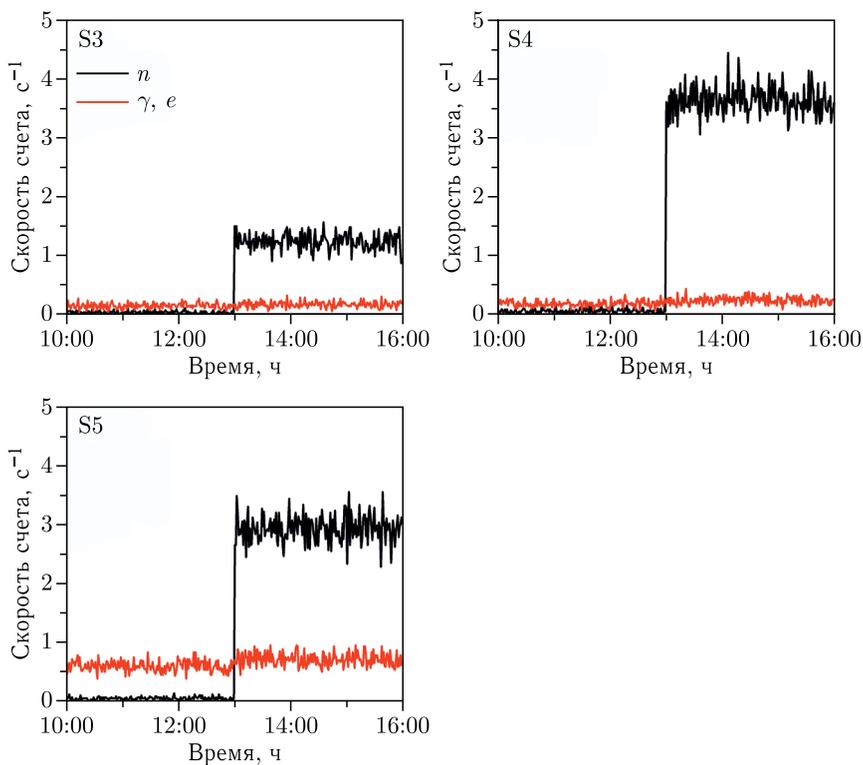


Рис. 8. Скорость счета нейтронов и заряженных частиц для образцов S3, S4 и S5 при измерениях с источником нейтронов и без него

Из результатов тестирования различных конструкций нейтронных модулей можно сделать вывод о том, что оптимальной является конструкция S5, в которой светосбор осуществляется с обеих поверхностей слоя сцинтиллятора. Подобная конструкция имеет наилучшую эффективность светосбора. При этом ее относительная эффективность регистрации нейтронов немного меньше, чем у S4. Однако в конструкции S4 используются два сцинтиллирующих слоя и, соответственно, имеется в два раза больше ядер-захватчиков нейтронов  $^{10}\text{B}$ , что увеличивает долю захваченных, но незарегистрированных при этом нейтронов. Это, в свою очередь, негативно влияет на эффективность регистрации при применении модулей подобной конструкции в нейтронном детекторе, поскольку нейтроны, диффундируя в его объеме, могут проходить через слой сцинтиллятора несколько раз.

Для выбранного образца S5 проведены исследования неоднородности светосбора. Схема измерений показана на рис. 9. Для коллимирования потока нейтронов источник был обернут кадмиевыми листами с окном размером  $5 \times 5$  см в верхней грани. Источник устанавливался под моду-

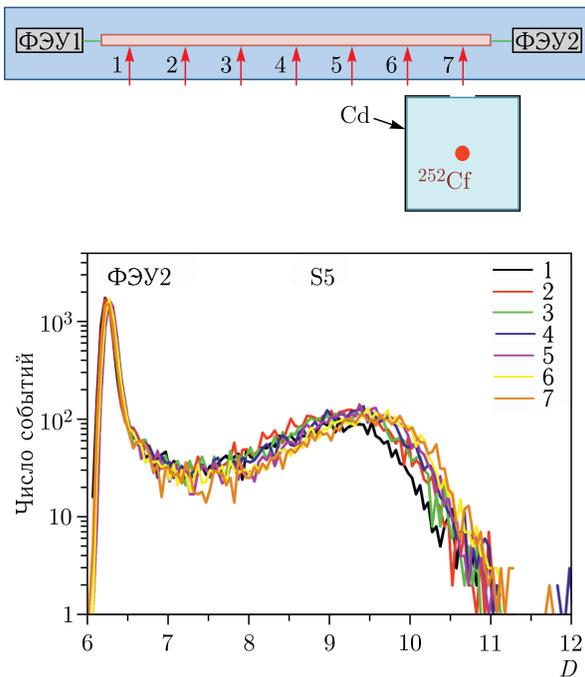


Рис. 9. Схема исследования неоднородности светосбора (сверху) и распределения по параметру  $D$  для канала 1 и различных положений источника нейтронов (снизу)

лем на расстоянии 5 см. Положение источника вдоль модуля изменялось с шагом 10 см. Наблюдается снижение числа собранных фотонов от сцинтилляционной вспышки при удалении источника от входного окна фотоприемника, что проявляется в уменьшении наиболее вероятного значения нейтронного пика в распределениях по параметру  $D$  (рис. 9, снизу). Вклад неоднородности в скорость счета нейтронов составил менее 10%.

### ОПТИМИЗАЦИЯ И ПРОВЕРКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НЕЙТРОННОГО МОДУЛЯ

В дальнейшем планируется использование множества подобных модулей. Поэтому для проверки технологии изготовления и повторяемости характеристик модулей были собраны четыре образца с конструкцией модуля S5: S5\_1, S5\_2, S5\_3, S5\_4. При этом был доработан оптический разъем, формирующий единый жгут оптических волокон для обеспечения возможности использования в качестве фотоприемника SiPM с размерами  $6 \times 6$  мм. Также была изменена конструкция внешнего корпуса модуля, в результате чего увеличена его жесткость и улучшена светоизоляция. Сборка модулей включает несколько этапов (рис. 10):

- подготовка корпуса и светоотражающего покрытия;
- формирование первого светособирающего слоя из 9 оптических волокон, залитых оптическим компаундом;
- формирование сцинтилляционного слоя толщиной  $50 \text{ мг/см}^2$ ;
- формирование второго светособирающего слоя;

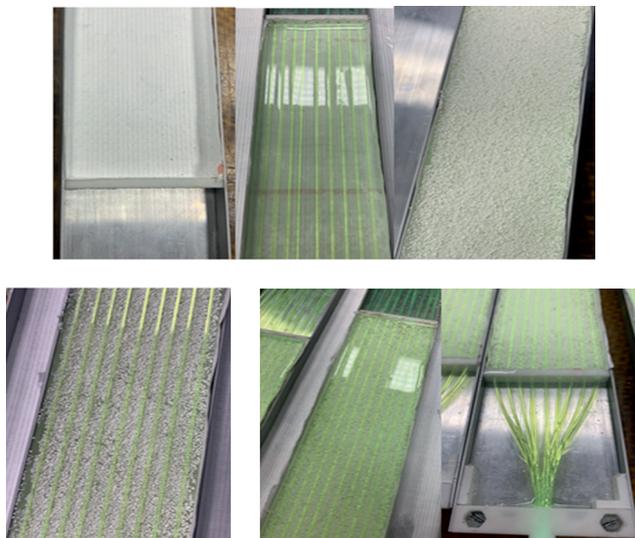


Рис. 10. Этапы сборки нейтронных модулей

— формирование оптических волокон в единые жгуты по 18 шт. и вклейка в оптические разъемы.

После сборки четырех образцов было проведено их тестирование с источником нейтронного излучения  $^{252}\text{Cf}$  (в замедлителе) и без источника (см. раздел «Стенд для тестирования и методика регистрации нейтронов»). Измерения для каждого набора проводились в течение 3 ч. Полученные в результате измерений распределения сигналов по значениям параметра  $D$  для первого канала регистрации представлены на рис. 11. Распределения сигналов по значениям параметра  $D$  для второго канала имеют аналогичный вид. Дополнительно были проведены повторные измерения для исходного образца с конструкцией S5 (S5\_0). Полученные распределения подобны друг другу и имеют выраженные нейтронные пики при измерениях с источником. По этим распределениям определены пороги отбора сигналов от нейтронов, которые для всех модулей S5\_x получились одинаковыми и составили  $D = 7$ .

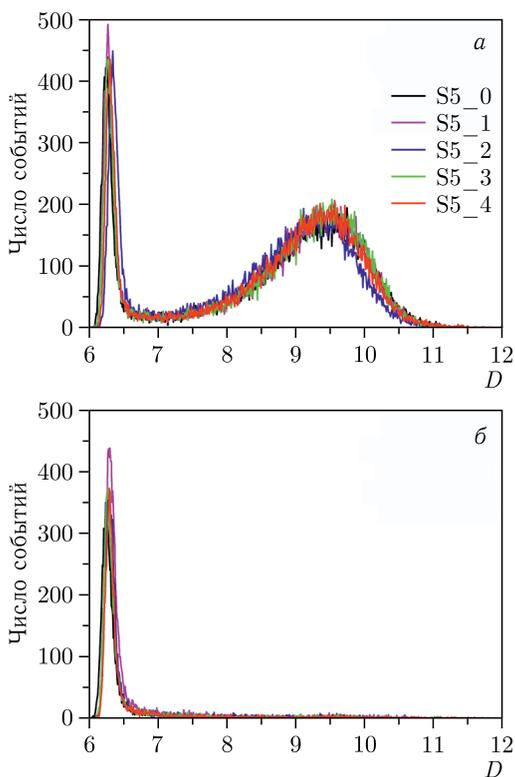


Рис. 11. Распределения по значениям параметра  $D$  (канал 1) для образцов с конструкцией S5 при измерениях с источником нейтронов (а) и без него (б)

**Таблица 2. Скорости счета нейтронов и заряженных частиц образцами нейтронного модуля с конструкцией S5**

Модуль	Источник $^{252}\text{Ci}$	$N_n, \text{c}^{-1}$	$N_{e-\gamma}, \text{c}^{-1}$
S5_0	+	$2,74 \pm 0,21$	$0,70 \pm 0,12$
	-	$0,04 \pm 0,03$	$0,56 \pm 0,10$
S5_1	+	$2,81 \pm 0,20$	$0,75 \pm 0,11$
	-	$0,06 \pm 0,02$	$0,73 \pm 0,12$
S5_2	+	$2,76 \pm 0,22$	$0,68 \pm 0,12$
	-	$0,05 \pm 0,03$	$0,56 \pm 0,10$
S5_3	+	$2,86 \pm 0,21$	$0,67 \pm 0,12$
	-	$0,04 \pm 0,03$	$0,54 \pm 0,10$
S5_4	+	$2,83 \pm 0,18$	$0,63 \pm 0,12$
	-	$0,05 \pm 0,03$	$0,50 \pm 0,09$

С учетом определенного порогового значения параметра  $D$  (критерия отбора) получены скорости счета образцами нейтронов ( $N_n$ ) и заряженных частиц ( $N_{e-\gamma}$ ) (табл. 2). Скорости счета нейтронов для всех образцов совпадают в пределах погрешности. Средняя скорость счета нейтронов составила  $(2,8 \pm 0,4) \text{c}^{-1}$ . Полученные результаты демонстрируют возможность создания нейтронных модулей с одинаковой эффективностью регистрации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан нейтронный модуль для нейтронного детектора на основе сцинтилляционной композиции  $\text{ZnS}(\text{Ag}) + \text{V}_2\text{O}_5$  (ЛРБ-2) с волоконно-оптическим светосбором, который имеет плоскую конструкцию и высокую однородность светосбора. За счет использования двухканального съема сигнала обеспечено подавление шумов фотоприемников, а также реализована возможность надежного выделения нейтронных сигналов.

Исследование различных вариантов конструкций нейтронного модуля показало, что оптимальной является конструкция с одним сцинтилляционным слоем, размещенным между двумя светособирающими слоями, которая имеет наилучшую эффективность светосбора и хорошую эффективность регистрации нейтронов.

По результатам тестирования партии из 5 нейтронных модулей показано, что используемая технология изготовления обеспечивает повторяемость их характеристик даже в лабораторных условиях.

**Благодарности.** Авторы работы благодарят коллектив ЭК НЕВОД за помощь в создании нейтронного модуля и дискуссии, а также группу сотрудников под руководством М. Д. Скорохватова за обсуждения концепции создания нейтронного детектора.

**Финансирование.** Работа выполнена на уникальной научной установке «Экспериментальный комплекс НЕВОД» при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (в рамках проекта № FSWU-2022-0018 «Нейтринные детекторы для дистанционного контроля ядерных реакторов и астрофизических установок» создается нейтронный модуль) и Российского научного фонда (в рамках гранта № 23-22-00399 разработана методика разделения сигналов).

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Чепурнов А. С.* Нейтринный метод мониторинга ядерных реакторов — история и текущее состояние вопроса // Труды VI Междунар. конф. «Ядерные технологии XXI века». 2016. С. 105–116.
2. *Carter R. E. et al.* Free Antineutrino Absorption Cross Section: II. Expected Cross Section from Measurements of Fission Fragment Electron Spectrum // *Phys. Rev.* 1959. V. 113, No. 1. P. 280–286.
3. *de Kerret H. et al.* The Double Chooz Antineutrino Detectors // *Eur. Phys. J.* 2022. V. 82. P. 804.
4. *Абрамов А. В. и др.* Детектор IDREAM на Калининской АЭС: статус и перспективы // ЭЧАЯ. 2023. Т. 54, вып. 3. С. 592–601.
5. *Serebrov A. P. et al.* Search for Sterile Neutrinos with the Neutrino-4 Experiment and Measurement Results // *Phys. Rev. D.* 2021. V. 104. P. 032003.
6. *Alekseev I. et al.* DANSS: Detector of the Reactor AntiNeutrino Based on Solid Scintillator // *J. Instrum.* 2016. V. 11. P. P11011.
7. Официальный сайт эксперимента PROSPECT. <https://prospect.yale.edu>.
8. *Andriamirado M. et al.* PROSPECT-II Physics Opportunities // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 2022. V. 49. P. 070501.
9. Официальный сайт Daya Bay Neutrino Experiment. <https://www.bnl.gov/science/dayabay.php>.
10. *Huber P. et al.* CHANDLER R&D Status // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1216. P. 012014.
11. *Ahn J. K. et al.* Observation of Reactor Electron Antineutrinos Disappearance in the RENO Experiment // *Phys. Rev. Lett.* 2012. V. 108. P. 191802.
12. *Youngju Ko et al.* NEOS Experiment // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1216. P. 012004.
13. *Jinyu Kim.* New Results from NEOS-II. [http://vietnam.in2p3.fr/2022/neutrinos/transparencies/01\\_monday/01\\_morning/2\\_kim.pdf](http://vietnam.in2p3.fr/2022/neutrinos/transparencies/01_monday/01_morning/2_kim.pdf).
14. *Boireau G. et al.* Online Monitoring of the Osiris Reactor with the Nucifer Neutrino Detector // *Phys. Rev. D.* 2016. V. 93. P. 112006.
15. *Lane C. et al.* A New Type of Neutrino Detector for Sterile Neutrino Search at Nuclear Reactors and Nuclear Nonproliferation Applications. arXiv:1501.06935.
16. *Hangkun Xu et al.* Calibration Strategy of the JUNO-TAO Experiment // *Eur. Phys. J. C.* 2022. V. 82. P. 1112.
17. Официальный сайт Eljen Technology. <https://eljentechnology.com/products/neutron-detectors>.

18. Официальный сайт Saint-Gobain Crystals. <https://www.saint-gobain.com/en>.
19. Официальный сайт ЗАО НПФ «Люминофор». Сцинтиллятор ЛРД-2. <https://luminophor.ru/catalog/lyuminoфорy/radiolyuminoфорy/stsintillyator/stsintillyator-lrb-2/>.
20. *Gromushkin D. M. et al.* The Array of Scintillation Detectors with Natural Boron for EAS Neutrons Investigations // *J. Instrum.* 2017. V. 12, No. 7. P. C07029.
21. *Bing-Bing Li et al.* Electron–Neutron Detector Array (ENDA) // *Phys. At. Nucl.* 2021. V. 84. P. 181–186.
22. Экспериментальный комплекс НЕВОД. М.: НИЯУ МИФИ, 2022. 260 с.
23. *Стенькин Ю. В. и др.* Вариации фонового потока тепловых нейтронов на Камчатке // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2022. Т. 86, № 5. С. 758–760.
24. Официальный сайт Kuraray. <http://kuraraypsf.jp/psf/ws.html>.
25. Характеристики компаунда ELASTOSIL RT 601 на официальном сайте производителя <https://www.wacker.com/h/en-us/c/elastosil-rt-601-ab/p/000005741>.
26. Характеристики материала Tyvek на официальном сайте производителя <https://www.dupont.com/brands/tyvek.html>.
27. Официальный сайт Geant4. <https://geant4.web.cern.ch/>.
28. *Kuzmenkova P. S. et al.* A Comparison of Neutron Identification Methods in Inorganic ZnS-Based Scintillators // *Phys. At. Nucl.* 2021. V. 84. P. 1588–1592.