

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ 3D-ПЕЧАТИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСА СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА

© 2025 г. А. В. Вересникова^{1),2)}, Ю. М. Гаврилюк¹⁾, В. В. Казалов^{1),2),3),*},
М. М. Кочкаров^{1),2)}

Поступила в редакцию 24.09.2024 г.; после доработки 24.09.2024 г.; принята к публикации 24.09.2024 г.

В работе рассматривается возможность использования технологии 3D-печати для изготовления конструктивных элементов детекторов ионизирующего излучения в низкофонных условиях. Представлены результаты измерения, проведенные с помощью сцинтилляционного детектора с корпусом, изготовленным из PETG-пластика.

Ключевые слова: 3D-печать, ионизирующее излучение, низкофонные условия, сцинтилляционный детектор

DOI: 10.31857/S0044002725010031, EDN: GSSSGT

1. ВВЕДЕНИЕ

Двойной бета-распад – это очень редкий ядерный переход, при котором (два нейтрона ядра одновременно преобразуются в два протона) ядро с Z -протонами распадается на ядро с $Z + 2$ -протонами и тем же массовым числом A . Распад может произойти только в том случае, если масса исходного ядра больше массы конечного ядра, а переход в состояние $Z + 1$ запрещен или сильно подавлен. Существует более 30 изотопов, для которых предсказано существование $\beta\beta$ -распада [1–3]. Существует два вида данного распада:

- двухнейтринный двойной бета-распад ($2\nu\beta\beta$), состоящий из двух одновременных бета-распадов, ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+2}X + 2e^- + 2\bar{\nu}$, который наблюдался в нескольких изотопах [1] с периодами полураспада в диапазоне 10^{18} – 10^{21} лет;
- безнейтринный двойной бета-распад ($0\nu\beta\beta$), ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+2}X + 2e^-$, гипотетический редкий распад, который может иметь место только в том случае, если нейтрино является массивной майорановской частицей и требует расширения стандартной модели электрослабых взаимодействий, поскольку нарушает сохранение лептонного числа и, следовательно,

довательно, запрещен в Стандартной модели [2, 3]. Поэтому наблюдение двойного бета-распада без испускания нейтрино будет означать майорановский характер нейтрино.

Сцинтилляционные методы регистрации ионизирующего излучения широко используются в нейтринной физике. Для решения актуальных задач используются сцинтилляторы, нагруженные различными металлами. Так, в первых экспериментах по поиску антинейтрино использовался сцинтиллятор, содержащий кадмий. В современных экспериментах по поиску $0\nu2\beta$ -распада предлагается внедрять в жидкий сцинтиллятор изотопы ${}^{96}\text{Zr}$ [4, 5], ${}^{150}\text{Nd}$ [5–7] и ${}^{130}\text{Tl}$ [8]. В экспериментах по регистрации низкоэнергетических солнечных нейтрино используется сцинтиллятор с содержанием изотопа ${}^{115}\text{In}$, обладающего высоким сечением с нейтрино и хорошей сигнатурой сигнала [5, 9].

Одним из наиболее перспективных кандидатов для поиска $0\nu2\beta$ -распада является изотоп ${}^{150}\text{Nd}$, что обусловлено большой энергией перехода ($Q_{\beta\beta} = 3.367$ МэВ) и высоким атомным номером. Большая энергия $0\nu2\beta$ -распада ${}^{150}\text{Nd}$ повышает вероятность его обнаружения за счет значительного улучшения отношения фон/сигнал для эксперимента и увеличения энергетического разрешения детектора. Создание жидкого органического сцинтиллятора на основе неодима является важным этапом в разработке детектора для эксперимента по поиску $0\nu2\beta$ -распада на изотопе ${}^{150}\text{Nd}$.

¹⁾ Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия.

²⁾ Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия.

³⁾ Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия.

* E-mail: vvk1982@mail.ru

В качестве прототипа крупногабаритного детектора в рамках проекта “Новые методы исследования безнейтринного двойного бета-распада” [10] разработан детектор с цилиндрической сцинтилляционной ячейкой диаметром 10 см и длиной 30 см, изготовленной из оптического кварца. Данный материал имеет хорошую оптическую прозрачность, хорошую стойкость к агрессивным средам, достаточно хорошую механическую прочность — толщина стенки до 5 мм позволяет проводить различные работы с изделием без опасения его повредить простым сдавливанием руками или при заполнении/опустошении образцом жидкого сцинтиллятора. Однако образцы доступного оптического кварца не всегда отвечают требованию по радиоактивной чистоте. Например, активность радиоактивных примесей в образце оптического кварца, исследованного при отборе материала для изготовления сцинтилляционной ячейки, имеет величину для ^{238}U , ^{232}Th , а также для ^{40}K на несколько порядков выше требуемого значения, табл. 1.

Параллельно с измерением активности радиоактивных примесей в кварце, ФЭУ и других конструктивных элементах будущей низкофоновой экспериментальной установки проводились исследования различных пластиков для 3D-печати с целью изучения применения этих материалов в низкофоновых экспериментах. Было обнаружено, что некоторые из образцов пластика, например, PETG [11], имеют значения активности радиоактивных примесей меньше, чем доступный на рынке оптический кварц. В табл. 1 представлены значения активностей для образцов кварца и пластика.

PETG — это модифицированный полиэтилен-терефталат (PET), в который на молекулярном уровне добавлен гликоль для улучшения прочности и долговечности, что также способствует 3D-печати [12]. И это наиболее часто используемый тип пластика (в виде PET). PETG-пластики обладают высокой прочностью, гибкостью, малой вероятностью расслаивания и деформации в ходе печати. PETG прекрасно противостоит разному воздействию со стороны окружающей

среды. Материал характеризуется стойкостью к растворителям, ветру, дождю, ультрафиолету.

Основываясь на указанных выше свойствах PETG-пластика и результатах измерения активности радиоактивных примесей, было принято решение изготовить небольшую тестовую сцинтилляционную ячейку из белого PETG-пластика. В процессе работы над сцинтилляционной ячейкой исследовались следующие вопросы:

- устойчивость PETG-пластика к воздействию растворителя ЛАБ [13], который будет использоваться в составе будущего сцинтиллятора;
- будут ли стенки ячейки отражать сцинтилляционный свет (будет ли проблема с собиранием сцинтилляционного света);
- насколько сложно будет изготовить ячейку сложной геометрической формы.

2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОЙ ЯЧЕЙКИ С ПОМОЩЬЮ 3D-ПЕЧАТИ

Элементы ячейки, за исключением иллюминатора, полностью напечатаны на 3D-принтере из PETG-пластика белого цвета. Конструкция ячейки включает крышку, тело ячейки и основание. Крышка представляет собой цилиндр с окошком под диаметр фотоумножителя ФЭУ-97 на одном из торцов. На другом торце крышки на внутренней поверхности имеется резьба. Тело ячейки цилиндрическое с резьбой на всей внешней поверхности. С одного из торцов тела ячейки имеется окошко под размер иллюминатора с учетом площадки прилегания по периметру. Основание ячейки выполнено так же в форме цилиндра. Один торец имеет внутреннюю резьбу с рабочей длиной 10 мм, второй торец заглушен, и в нем располагается резьбовое отверстие под заливную пробку. Сама пробка изготовлена в форме болта М12. Между крышкой и телом ячейки располагается иллюминатор из оргстекла, резьбовое соединение деталей позволяет подобрать оптимальный прижим иллюминатора к телу ячейки. Тело

Таблица 1. Активность радиоактивных изотопов в образцах (мБк/кг); пределы установлены на 90%-ном уровне достоверности

Образец		Изотопы			
		^{226}Ra (^{214}Bi)	^{228}Ac	^{40}K	^{208}Tl
		Активность радиоактивных изотопов (мБк/кг)			
1	PETG	14.2 ± 3.2	15 ± 5	62 ± 20	7 ± 1.5
2	Кварц	161 ± 13	140 ± 22	500 ± 100	45 ± 8.5

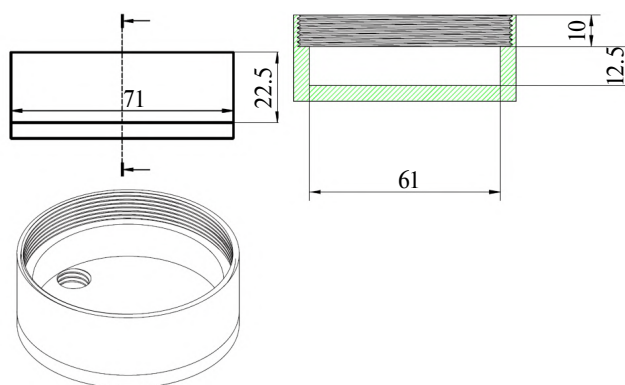


Рис. 1. Схематическое изображение основания сцинтилляционной ячейки. Размеры даны в мм.

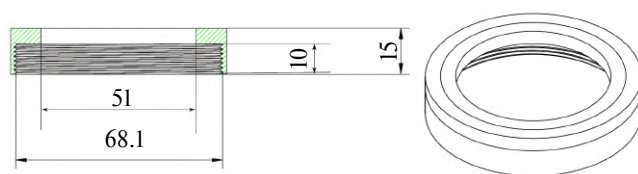


Рис. 2. Крышка сцинтилляционной ячейки, поджимающая оптическое окно. Размеры даны в мм.

ячейки имеет резьбовое соединение с основанием, что позволяет изменять в небольших пределах объем сцинтиллятора и высоту всей ячейки. Заливная пробка оснащена резиновой прокладкой для обеспечения герметичности. Все резьбовые соединения за исключением заливной пробки имеют шаг 1 мм.

Для изготовления деталей сцинтилляционной ячейки использовался 3D-принтер Ender-3S фирмы Creality3D [14]. С целью упрощения печати корпуса ячейки он был разделен на три части: основание, центральная часть, крышка, рис. 1–3.

Детали ячейки скрепляются между собой с помощью резьбового соединения. Все соединения промазываются специальным бензиностойким герметиком для предотвращения протекания жидкого сцинтиллятора. Смотровое окошко для подсоединения ФЭУ изготовлено из оргстекла. Оно прижимается к центральной части ячейки с помощью крышки. С целью предотвращения возможного протекания жидкого сцинтиллятора в местах прижима смотрового окошка оно также промазано бензиностойким герметиком. Заливка (заполнение) сцинтиллятора осуществляется через специальное отверстие, расположенное на донце ячейки. После заполнения сцинтиллятором данное отверстие закрывается с помощью заглушки с резиновым уплотнением. Внутренний рабочий объем ячейки составляет $\sim 73 \text{ см}^3$.

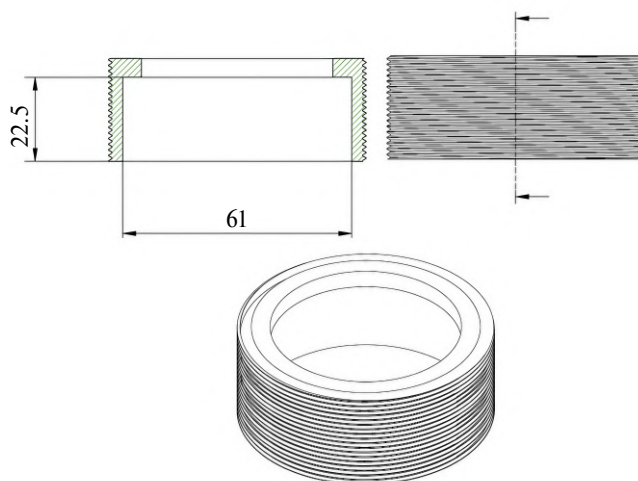


Рис. 3. Центральная часть сцинтилляционной ячейки. Размеры даны в мм.

3. ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОЙ ЯЧЕЙКИ

Для регистрации сцинтилляционного света используется ФЭУ-97. Оптическое соединение между ФЭУ и ячейкой обеспечивается с помощью кварцевого вазелина. ФЭУ, ячейка и конструкционные материалы помещаются вертикально в светоизолирующий кожух, изготовленный из алюминия, рис. 4.

Тестирование ячейки проводилось в отдельном помещении лабораторного корпуса БНО ИЯИ РАН [15]. Для снижения фона гамма-квантов от естественной радиоактивности экспериментальный стенд, содержащий ячейку, был окружен свинцовыми кирпичами с размерами $40 \times 75 \times 420 \text{ мм}^3$, рис. 5.

Питание ФЭУ обеспечивается высоковольтным источником ORTEC 556. Сигналы с ФЭУ, предварительно усиленные зарядочувствительным предусилителем, подаются на вход АЦП CAEN DT5724 [16].

Для изучения спектрометрических способностей ячейки были проведены измерения с калибровочными источниками ^{60}Co (3000 с) и ^{137}Cs (1000 с). На рис. 6 и рис. 7 представлены спектры данных источников.

Вследствие малого рабочего объема сцинтилляционной ячейки ($< 80 \text{ см}^3$) гамма-кванты от источника испытывают всего несколько (1–3) комптоновских рассеяний, поэтому спектр энергопотерь излучения в веществе сцинтиллятора представлен комптоновскими электронами отдачи без пика полного поглощения. Отдельно на спектре можно видеть зашкаливающие импульсы

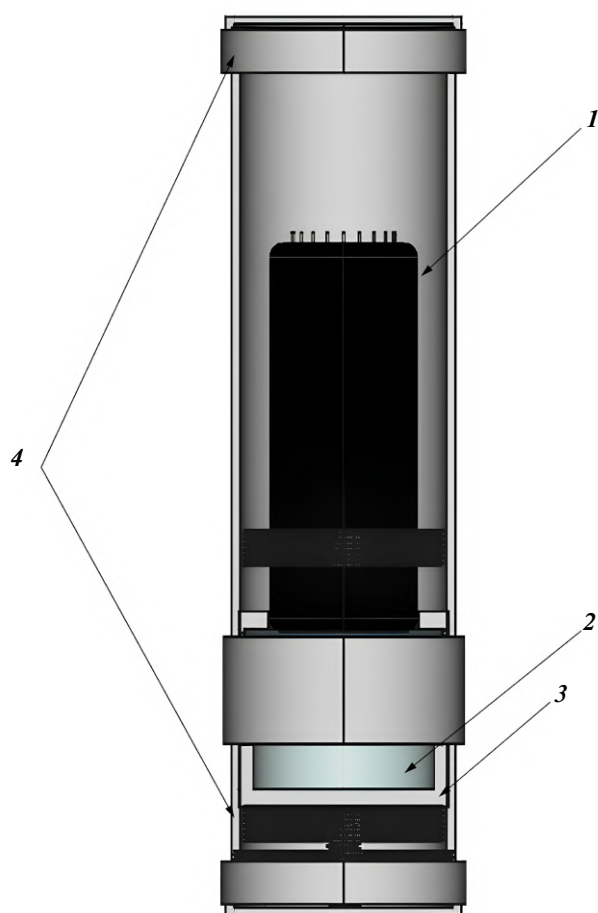


Рис. 4. Экспериментальный стенд в сборе. Неполный разрез. 1 – ФЭУ-97, 2 – сцинтиллятор, 3 – ячейка из PETG-пластика, 4 – светоизолирующий корпус.

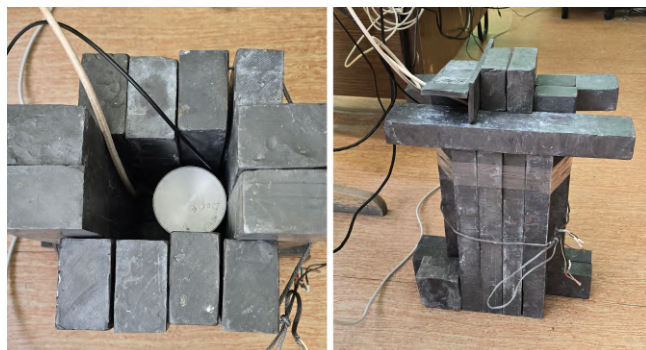


Рис. 5. Фотографии стенда, помещенного в защиту из свинцовых кирпичей.

сы в области 16000 канала, образуемые мюонами космических лучей.

После анализа спектров калибровочных источников, подтвердившего работоспособность, было принято решение о наборе спектра фона экспериментальной установки. На рис. 8 показан

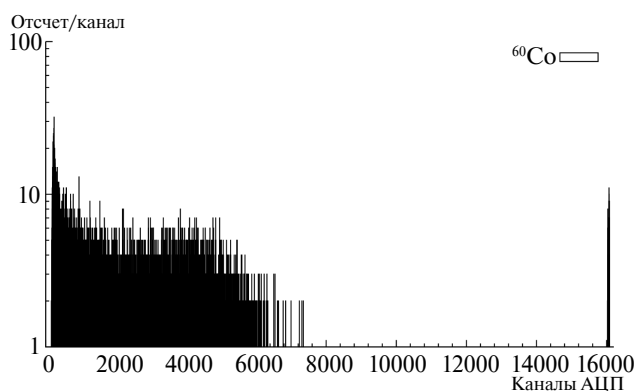


Рис. 6. Спектр калибровочного источника ^{60}Co .

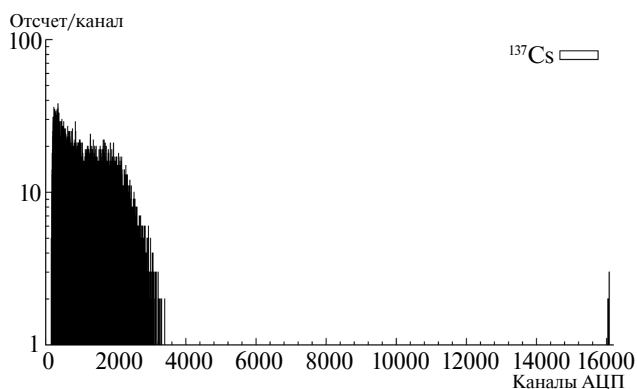


Рис. 7. Спектр калибровочного источника ^{137}Cs .

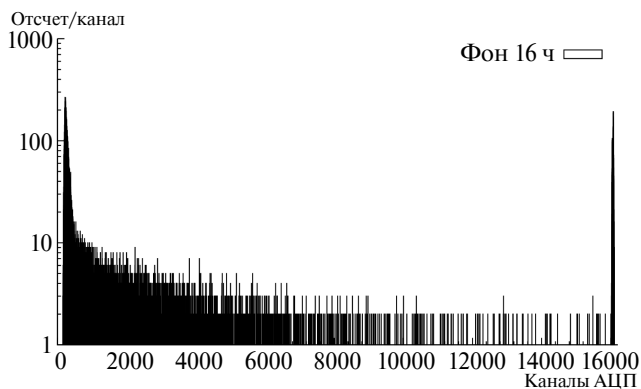


Рис. 8. Спектр фона детектора. Время набора составило 16 ч.

спектр фона, набранный за 16 ч в отдельном помещении Лабораторного корпуса БНО ИЯИ РАН.

Как и ожидалось, спектр фона не содержит ярко выделенных пиков от гамма-квантов природной радиоактивности и представлен комптоновскими электронами отдачи, а также энергопотерями мюонов космических лучей.

В целом измерения, проведенные в данной работе, подтвердили работоспособность сцинтил-

ляционного детектора с корпусом, изготовленным на 3D-принтере. Это открывает возможность дальнейшего использования технологии 3D-печати при изготовлении конструктивных деталей детекторов ядерного излучения, в том числе и для низкофоновых экспериментов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами был разработан и изготовлен сцинтилляционный детектор с корпусом, напечатанным с помощью 3D-принтера. Тестирование детектора проводилось с помощью калибровочных источников ^{137}Cs и ^{60}Co . Так же был проведен продолжительный набор фона для проверки стабильности работы сцинтилляционного детектора. Анализ полученных данных показал работоспособность сцинтилляционного детектора с корпусом, изготовленным методом 3D-печати.

На следующем этапе планируется изготовление детектора с рабочим объемом 3 л, который будет просматриваться двумя ФЭУ с обеих сторон корпуса. В качестве сцинтиллятора планируется использование сцинтиллятора, нагруженного металлом (Nd, Zr, Gd).

Данный детектор также может использоваться и при решении других задач, в частности, для долговременных исследований потока нейтронов в подземных лабораториях БНО ИЯИ РАН.

Отдельно будет изучена возможность изготовления торцевых оптических окон для ФЭУ методом 3D-печати. На данный момент данные окна производятся из оргстекла токарной обработкой. Реализация методики производства торцевых оптических окон методом 3D-печати позволит сократить время изготовления, а также уменьшить количество потенциальных источников радиоактивного фона в непосредственной близости от чувствительной области детектора при замене оргстекла на пластик для 3D-печати.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, проект FZZR-2022-0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. S. Barabash, *Universe* **6**, 159 (2020).
2. M. Agostini, G. Benato, J. A. Detwiler, J. Menéndez, and F. Vissani, *Rev. Mod. Phys.* **95**, 025002 (2023).
3. M. Agostini, F. F. Deppisch, and G. Van Goffrier, *J. High Energy Phys.* **2302**, 172 (2023).
4. Y. Fukuda, S. Moriyama, and I. Ogawa, *Nucl. Instrum. Methods A* **732**, 397 (2013).
5. Г. Я. Новикова, В. П. Моргалюк, Е. А. Янович, *ЖНХ* **66**, 10540 (2021).
6. И. Р. Барабанов, А. В. Вересникова, А. А. Моисеева, В. П. Моргалюк, Г. Я. Новикова, Е. А. Янович, *ЯФ* **86**, 310 (2023).
7. I. R. Barabanov, L. B. Bezrukov, G. Ya. Novikova, and E. A. Yanovich, *Instrum. Exp. Tech.* **60**, 533 (2017).
8. V. Albanese *et al.* (The SNO+ Collab.), *JINST* **16**, 08059 (2021).
9. C. Buck, F. X. Hartmann, T. Lasserre, D. Motta, S. Schonert, and U. Schwan, *J. Luminescence* **106**(1), 57 (2004).
10. I. R. Barabanov, A. V. Veresnikova, Yu. M. Gavrylyuk, V. I. Gurentsov, A. M. Gangapshev, V. V. Kazalov, G. Ya. Novikova, Z. Kh. Kalajokov, D. A. Tekueva, M. Sh. Thazaplichev, and E. A. Yanovich, *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **50**, 491 (2023).
11. PETG производства Bestfilament, https://bestfilament.ru/belyy-petg-plastik-bestfilament-dlya-3d-printerov-1-kg-1_75-mm/
12. Полиэтилентерефталат (PET) для 3D-печати, <https://top3dshop.ru/blog/petg-i-abs-kratkoe-sravnenie.html>
13. Линейный алкилбензол, https://newchemistry.ru/letter.php?n_id=1352
14. Ender-3S, <https://cvetmir3d.ru/blog/3d-obzory/obzor-3d-printera-ender3/>
15. Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН, <https://www.inr.ru/bno/>
16. CAEN DT5724, <https://www.caen.it/products/dt5724/>

THE RESEARCH OF THE APPLICATION OF 3D PRINTING FOR THE MANUFACTURE OF A SCINTILLATION DETECTOR CASE

© 2025 A. V. Veresnikova^{1,2}, Yu. M. Gavrylyuk¹, V. V. Kazalov^{1,2,3},
M. M. Kochkarov^{1,2}

¹*Institute of Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia*

³*National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia*

The paper considers the possibility of using 3D printing technology to manufacture structural elements of ionizing radiation detectors in low-background conditions. The results of measurements carried out using a scintillation detector with a housing made of PETG plastic are presented.