

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 539.1.074

СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТИКОВОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА РОССИЙСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

© 2025 г. Е. А. Литвинович^{a, b}, А. Ю. Оралбаев^{a, b}, Д. В. Попов^{a, b, *},
А. А. Растимешин^{a, b}, М. Д. Скорохватов^{a, b}, Д. А. Чмыхало^{a, b}

^aНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

^bНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

*E-mail: DVPopov@mephi.ru

Поступила в редакцию 08.10.2024 г.

После доработки 05.12.2024 г.

Принята к публикации 06.12.2024 г.

Проведено исследование спектрометрических характеристик образца $50 \times 50 \times 700$ мм пластикового сцинтиллятора российского производства на основе полистирола, получено значение энергетического разрешения $(13.3 \pm 0.5)\%$ для энергии 1 МэВ в единицах полной ширины на половине высоты, продемонстрирована однородность светособираания. Показано, что российский пластиковый сцинтиллятор по своим характеристикам не уступает зарубежным аналогам.

Ключевые слова: органический сцинтиллятор, сцинтилляционная пластмасса, детекторы ионизирующего излучения, калибровка органического сцинтиллятора

DOI: 10.56304/S2079562925060156

Органические сцинтилляторы на основе, например, полистирола или полиметилметакрилата широко используются для регистрации ядерных излучений в физических экспериментах [1–3], а также в различных промышленных приложениях [4, 5] и медицине, поскольку они имеют ряд преимуществ из-за невысокой стоимости и налаженного производства, удовлетворительного световых выхода, стабильных температурных и временных характеристик. В настоящей работе исследовались характеристики отечественного сцинтиллятора, изготовленного в АО “Институт физико-технических проблем”, для определения перспектив разработки масштабных сцинтилляционных спектрометров широкого спектра применений.

В задачах проектирования оценочные значения сцинтилляционных и оптических характеристик фотонных детекторов, определяющих их отклик на выделение энергии излучения внутри сцинтиллятора, можно получить на основе модельных расчетов с учетом непропорциональности светоотдачи. Однако для получения точных параметров необходима энергетическая калибровка с использованием источников ионизирующего излучения с последующим анализом преобразования выделенной энергии в детектируемый световой поток. Особенно это важно для сцинтилляторов больших размеров, в которых необходимо учитывать транспорт фотонов люминесценции до фотоприемника.

Световой поток в конкретном сцинтилляторе зависит от нескольких параметров, таких как форма и размер образца, его состав, включая вторичные флюоры. В настоящей работе исследовался образец пластикового сцинтиллятора из полистирола $(C_8H_8)_n$ размерами $50 \times 50 \times 700$ мм с добавками 2% p-terphenyl и 0.05% 1,4-Ди-(5-фенил-2-оксазолил)бензол (РОРО). Фотоны люминесценции детектировались идентичными вакуумными фотоэлектронными умножителями (ФЭУ) GONI N4021-2 с диаметром фотокатода 46 мм и спектром чувствительности в области от 290 до 650 нм, расположенными с двух торцов сцинтиллятора. Образец был покрыт диффузным отражателем Tyvek с сохранением воздушного зазора, что обеспечивало, согласно расчетам и данным работы [6], минимальную утечку фотонов люминесценции.

В работе исследовались наиболее важные характеристики сцинтиллятора: зависимость заряда импульса с ФЭУ $Q(E)$ от энергии, энергетическое разрешение $R(E)$ и зависимость собираемого заряда от места взаимодействия гамма-квантов в образце, которые в сочетании с обработкой импульсов электронным трактом характеризуют качество отдельного детектора. Энергетическая калибровка сцинтиллятора была основана на регистрации комптоновского рассеяния гамма-квантов от внешнего гамма-источника и определения позиции края E_{edge} распределения рассеянных электронов. Измерения проводились с точечными источниками

Таблица 1. Энергия гамма-излучения E_γ и соответствующая ей энергия комптоновского края E_{edge} для используемых гамма-источников.

Источник	E_γ , МэВ	E_{edge} , МэВ
^{22}Na	0.511 1.275	0.341 1.061
^{137}Cs	0.662	0.477
^{65}Zn	1.115	0.907

гамма-квантов ^{137}Cs , ^{22}Na и ^{65}Zn , размещенными в непосредственной близости от поверхности сцинтиллятора. Значения E_{edge} для используемых в работе источников излучения представлены в табл. 1.

Источники излучения последовательно перемещались вдоль пластика от одного торца к дру-

гому с шагом $\Delta l = 15$ см, на каждом шаге измерялись зарядовые спектры dN/dQ ФЭУ. Как будет показано, исследуемый образец обладал хорошей однородностью, т.е. суммарные спектры ФЭУ были идентичны при различных положениях источников. На рис. 1а представлены зарядовые спектры всех калибровочных источников за вычетом небольшого вклада фоновых событий. Как видно из рис. 1, положение комптоновского края E_{edge} каждого источника размыто в результате конечного энергетического разрешения и многократного рассеяния гамма-квантов.

Методика определения характеристик сцинтиллятора заключалась в расчетном моделировании спектров с последующей многопараметрической подгонкой параметров, описывающих шкалу детектора и энергетическое разрешение. Методом Монте-Карло проведено моделирование спектра

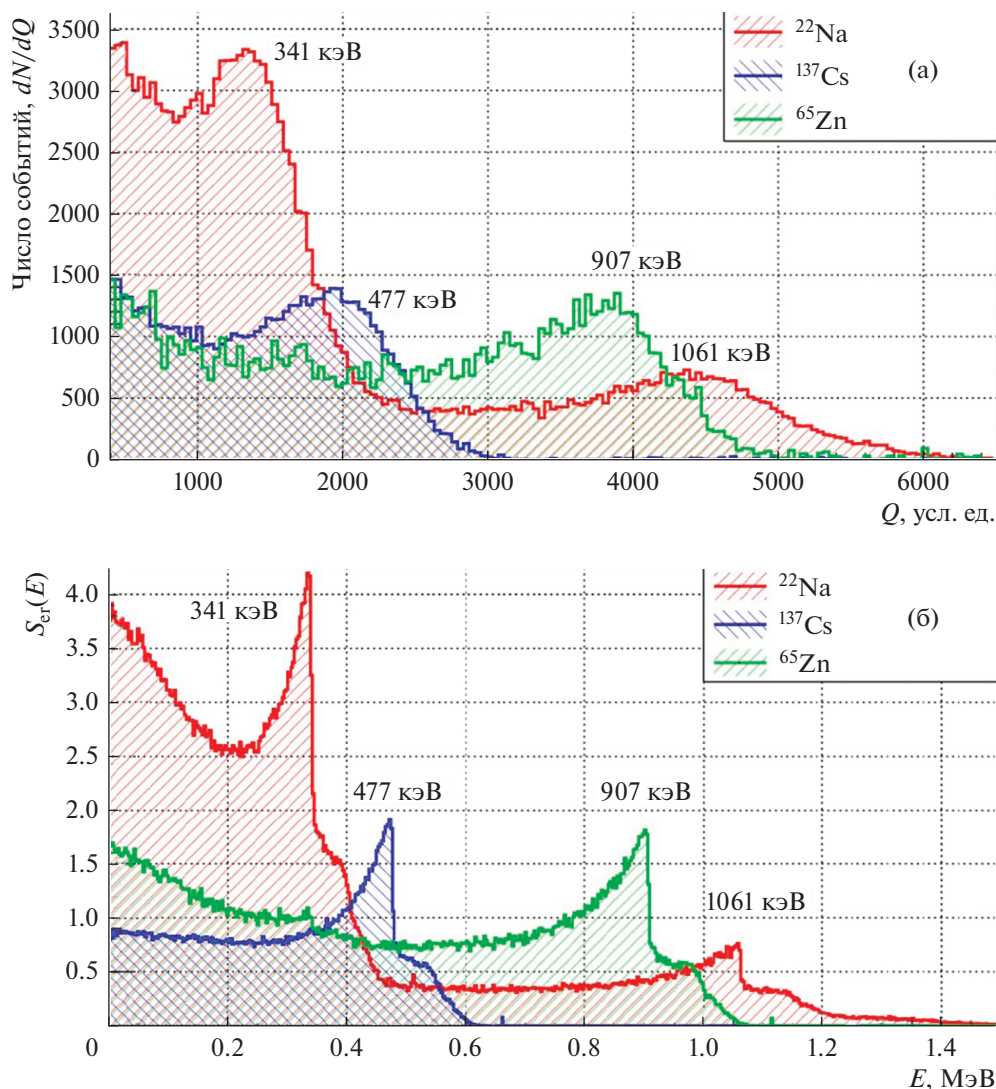


Рис. 1. Наблюдаемый зарядовый (а) и модельный энергетический (б) спектры используемых источников излучения.

энерговыведения комптоновских электронов в образце при падении гамма-квантов от внешнего источника на органический сцинтиллятор. Полученные спектры $S_{\text{ср}}(E)$ источников представлены на рис. 16. В расчете были учтены эффекты многократного рассеяния гамма-квантов, спектр которого в общем случае находится в области энергий до E_γ и искажает край комптоновского распределения.

Для параметризации и количественной оценки энергетического разрешения фотоэлектронов было использовано эмпирическое соотношение,

Таблица 2. Оптимальные параметры аппроксимации экспериментальных данных

Параметр	Значение
k , МэВ	$(22.5 \pm 0.2) \cdot 10^{-5}$
Q_0	17.10 ± 0.01
α^2	~ 0
β^2 , МэВ	$(7.7 \pm 1.6) \cdot 10^{-3}$
γ^2 , МэВ ²	$(9.8 \pm 1.6) \cdot 10^{-3}$

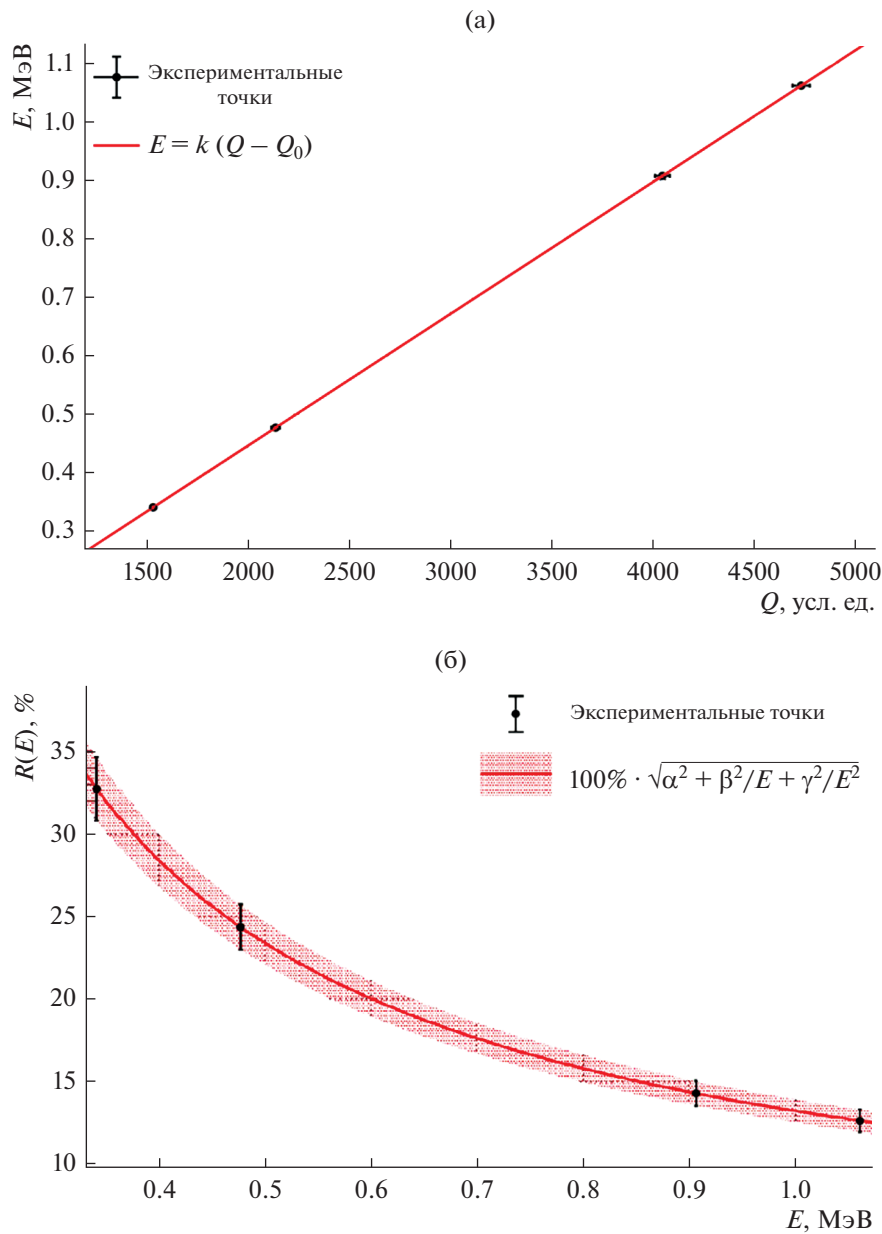


Рис. 2. Результаты калибровки сцинтиляционного детектора: (а) энергетическая шкала детектора, (б) относительное энергетическое разрешение $R(E)$, % в единицах ПШПВ.

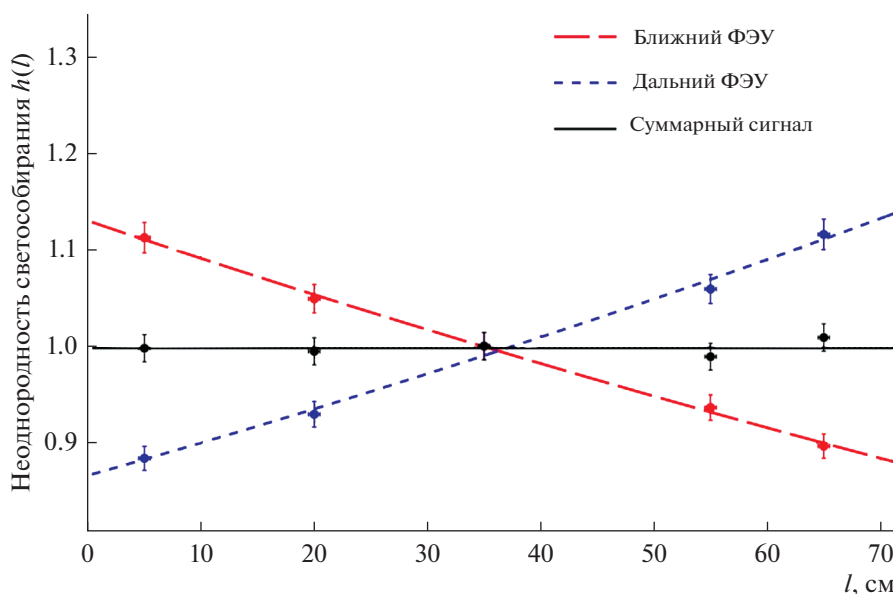


Рис. 3. Неоднородность светособирания сцинтилляционного детектора.

предложенное в работе [7] и наиболее широко используемое в литературе [7–9]:

$$R(E) = 100\% \sqrt{\alpha^2 + \beta^2/E + \gamma^2/E^2}, \quad (1)$$

где α учитывает неоднородность сцинтиллятора и неточность энерговыделения, β — вклад статистических эффектов регистрации фотоэлектронов и γ — систематический вклад, обусловленный шумами электроники.

По результатам калибровок была построена энергетическая шкала детектора и функция относительного разрешения $R(E)$, представленные на рис. 2. Из рисунка видно, что зависимость собираемого заряда от энергии, выделившейся в сцинтилляторе, в исследуемой области энергий линейна. Энергетическое разрешение на 1 МэВ составило $(13.3 \pm 0.5)\%$ в единицах ПШПВ. Наилучшее согласие Монте-Карло моделирования с экспериментальными данными было достигнуто при значении световыхода $LY \sim 10000/\text{МэВ}$. Определение LY проводилось путем многократного разыгрывания электронов фиксированной энергии в образце сцинтиллятора с последующим расчетом ширины распределения числа фотоэлектронов для различных значений световыхода. При сравнении отдельно учитывался измеренный вклад шумов электроники и ФЭУ γ , не связанный с характеристиками самого сцинтиллятора.

Итоговые данные аппроксимации экспериментальных данных представлены в табл. 2 (источники в середине пластика, сигнал снимался с обоих ФЭУ). Ввиду хорошей однородности сцинтиллятора, как будет показано ниже, и локализованного энерговыделения, параметр α в результа-

те аппроксимации экспериментальных данных оказался пренебрежимо малым.

Неоднородность светособирания по длине исследуемого образца, зависящая как от геометрических размеров и отражения на границах, так и от содержания примесей в исходном сырье при производстве, связана с поглощением и утечкой фотонов люминесценции при транспорте до фотокатодов ФЭУ. Измерения неоднородности проводились при перемещении источников вдоль образца. В качестве показателя были использованы относительные амплитуды сигналов каждого ФЭУ и их суммы, нормированные на значения в центральном положении источников, т.е. в точке 35 см. Для параметризации зависимости неоднородности применялась функция $h(l) = h_0 \exp(-l/l_{\text{att}})$, где l_{att} — эффективная длина ослабления сигнала ФЭУ. Результаты измерений представлены на рис. 3. Значение l_{att} при регистрации сигналов одним ФЭУ составило 285 ± 25 см, а неоднородность при считывании сигнала обоими ФЭУ в пределах ошибок равна нулю.

В заключение отметим, что характеристики исследуемого образца органического сцинтиллятора сопоставимы с лучшими зарубежными аналогами, например, предоставляемыми фирмами ELJEN Technology [10], Luxium Solutions (Saint-Gobain) [11], а также пластиковыми сцинтилляторами китайского производства [12] тех же размеров.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам НИЯУ МИФИ А.А. Петрухину и Д.М. Громушкину за постоянный интерес и обсуждения работы, Влазику К.Ф.

и Маджидову А.И. за помощь при подготовке проведения эксперимента.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект “Нейтринные детекторы для дистанционного контроля ядерных реакторов и астрофизических установок” № FSWU-2022-0018).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Monhoev R.D., Astapov I.I., Bezyazeev P.A., et al. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2023. V. 87. P. 893. <https://doi.org/10.3103/S1062873823702799>
2. Glushkov A.V., Saburov A.V., Ksenofontov L.T., Lebedev K.G. // Phys. At. Nucl. 2024. V. 87. P. 25. <https://doi.org/10.1134/S1063778824020121>
3. Скробова Н.А. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2023. Т. 50 (12). С. 79.
4. Nemchenok I.B., Kamnev I.I., Shevchik E.A., Suslov I.A. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2021. V. 85. P. 476. <https://doi.org/10.3103/S1062873821050154>
5. Nefedov Yu.Ya., Usenko P.L. // Instrum. Exp. Tech. 2016. V. 59. P. 115. <https://doi.org/10.1134/S0020441216010097>
6. Брутвич Г.И., Бреховских В.В., Семенов В.К., Холоденко С.А. Основные характеристики полистирольных сцинтилляторов производства ИФВЭ. 2013. Протвино: ИФВЭ.
7. Sparrman P., Lindskog J., Marelius A. // Nucl. Instrum. Methods. 1966. V. 41 (2). P. 299. [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(66\)90015-2](https://doi.org/10.1016/0029-554X(66)90015-2)
8. Dietze G., Klein H. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 1982. V. 193 (3). P. 549. [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(82\)90249-X](https://doi.org/10.1016/0029-554X(82)90249-X)
9. Nattress J., Jovanovic I. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2017. V. 871. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.07.024>
10. <https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212>.
11. <https://www.luxiumsolutions.com/radiation-detection-scintillators/plastic-scintillators/bc400-bc404-bc408-bc412-bc416>.
12. <https://www.whgohi.com/productinfo/902532.html>.

Spectrometric Characteristics of Russian-Made Plastic Scintillator

E. A. Litvinovich^{1, 2}, A. Y. Oralbaev^{1, 2}, D. V. Popov^{1, 2, *},
A. A. Rastimeshin^{1, 2}, M. D. Skorokhvatov^{1, 2}, and D. A. Chmykhalo^{1, 2}

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

²National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia

*e-mail: DVPopov@mephi.ru

Received October 8, 2024; revised December 5, 2024; accepted December 6, 2024

Abstract—A study of the spectrometric characteristics of a 50 × 50 × 700 mm sample of a Russian-made plastic scintillator based on polystyrene was carried out. An energy resolution value (13.3 ± 0.5)%/MeV in units of FWHM was obtained, and uniformity of light collection was demonstrated. It is shown that the Russian plastic scintillator is not inferior in its characteristics to foreign analogues.

Keywords: organic scintillator, scintillation plastic, radiation detectors, calibration of an organic scintillator