

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕТОВОХОДА СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ: РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА С ИСТОЧНИКОМ ГАММА-КВАНТОВ

И. С. Вершинин, В. В. Кулик, В. В. Гаганов, А. В. Долгополов, В. С. Теменков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Детекторы на основе органических сцинтилляторов являются эффективным измерительным инструментом во многих современных экспериментах [1-3]. Они характеризуются коротким временем высвечивания, высокой радиационной стойкостью, отсутствием значимых ограничений на размеры сцинтиллятора, надежностью в эксплуатации. Световыход сцинтиллятора является одной из важнейших его характеристик. Однако в настоящее время нет исчерпывающих данных о зависимости световыхода органических сцинтилляторов от энергии регистрируемых частиц. Целью данной работы являлось создание стенда для исследования зависимости световыхода органического сцинтиллятора на основе полистирола от энергии электронов и протонов. На первом этапе работы был разработан и отлажен в ходе экспериментов с радиоизотопным источником гамма-излучения ^{60}Co измерительный стенд на основе схемы совпадений.

Постановка измерений

Основу измерительного стенда составляет схема комптоновских совпадений с двумя сцинтилляционными детекторами [4–9] (рис. 1). Один из детекторов (анализирующий) размещался на оси пучка первичного излучения; второй (управляющий) размещался так, чтобы прямая, соединяющая центры двух сцинтилляторов, составляла заданный угол по отношению к направлению пучка первичного излучения. Анализирующий детектор регистрирует электроны отдачи, образованные в результате взаимодействия проходящего через него пучка гамма-квантов. Управляющий детектор регистрирует гамма-кванты, рассеянные в сцинтилляторе (1) под заданным углом. Образование световой вспышки в управляющем и анализирующем детекторах происходит практически одновременно. С помощью схемы совпадений отбираются импульсы, соответствующие только тем электронам отдачи, которые образуются в сцинтилляторе анализирующего детектора в результате рассеяния первичных гамма-квантов под заданным углом. Энергия электронов отдачи при фиксированной энергии первичных гамма-квантов зависит от выбранного угла рассеяния. Рассматриваемая схема, в отличие от усовершенствованной схемы комптоновских совпадений [10–13], не накладывает ограничений на форму и размеры исследуемого сцинтиллятора и на конструкцию детектора.

В экспериментах были задействованы два детектора с фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) СНФТ-3 [14] и полистирольным сцинтиллятором цилиндрической формы диаметром 9,0 см и высотой 10,0 см.

Для улучшения светосбора, обращенная к ФЭУ часть сцинтиллятора была выполнена в виде усеченного конуса высотой 1,5 см; все поверхности сцинтиллятора, кроме торцевого окна диаметром 6,0 см, были покрыты светоотражающей краской. Для обеспечения оптического контакта между торцевым окном сцинтиллятора и входным окном ФЭУ (диаметром 5,5 см) область контакта была заполнена кремний-органической смазкой. Высокое напряжение для питания ФЭУ СНФТ-3 составляло -4 кВ.

На первом этапе работ были выполнены эксперименты с радиоизотопным источником ^{60}Co (4) с активностью $9,61 \cdot 10^7$ Бк на момент измерений. Измерения были выполнены для семи значений угла рассеяния в диапазоне от 15° до 150° . Расстояние между детекторами составляло 61,0 см, кроме измерений под углами 15° и 30° , для которых расстояние составляло 126,5 см. Использование коллиматора предотвращает попадание прямых, не испытавших рассеяние частиц в управляющий детектор.

На рис. 2 показана схема соединений измерительного оборудования. Сигнал с анализирующего детектора "А" подавался через предусилитель с задержкой 100 нс (кабель 20 м) на вход усилителя, далее с выхода "CRM" направлялся на входы "STOP" время-амплитудных преобразователей 1 и 2. При измерениях под углами 30° и 15° значение "Coarse Gain" усилителя было увеличено с 20 до 50 и 100 соответственно. Сигнал с управляющего детектора "С" подавался на входы "START" тех же время-амплитудных преобразователей.

Преобразователь 1 на выходе "SCA" формировал управляющий сигнал, подаваемый на вход "GATE" анализатора рабочего временного окна "Е", аналогично преобразователь 2 – с выхода "SCA" – на вход "GATE" анализатора фонового окна "F". На входы обоих анализаторов сигнал подавался с выхода "BIPOLAR" усилителя.

Для контроля распределения импульсов по времени пролета использовался анализатор "Т", на который подавались сигналы с выхода "TAC" преобразователя 2. Ширина канала анализатора "Т" соответствовала 1 нс. Управление временным анализатором (по входу "GATE") осуществлялось с выходов "SCA" обоих время-амплитудных преобразователей.

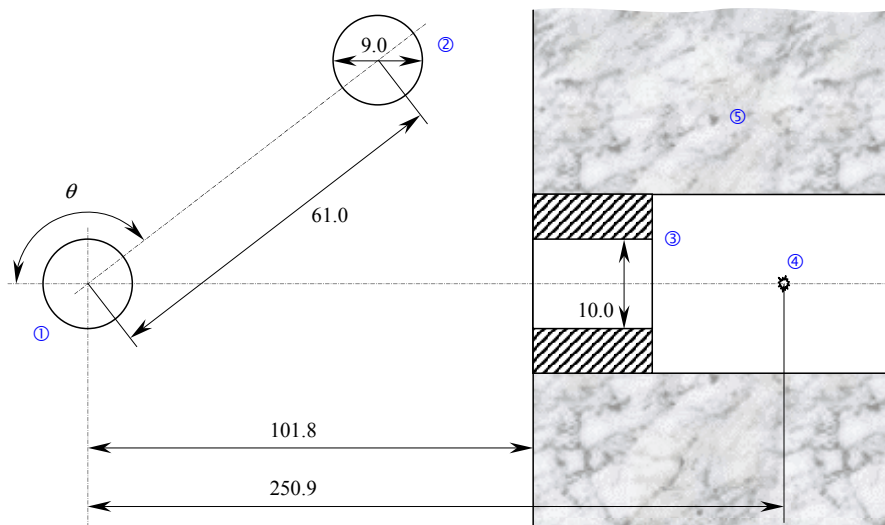


Рис. 1. Схема размещения детекторов: 1 – анализирующий детектор; 2 – управляющий детектор; 3 – стальной коллиматор с отверстием диаметром 10.0 см; 4 – радиоизотопный источник ^{60}Co ; 5 – бетонная стена с каналом вывода излучения. Вид сверху без соблюдения масштаба. Размеры – в см

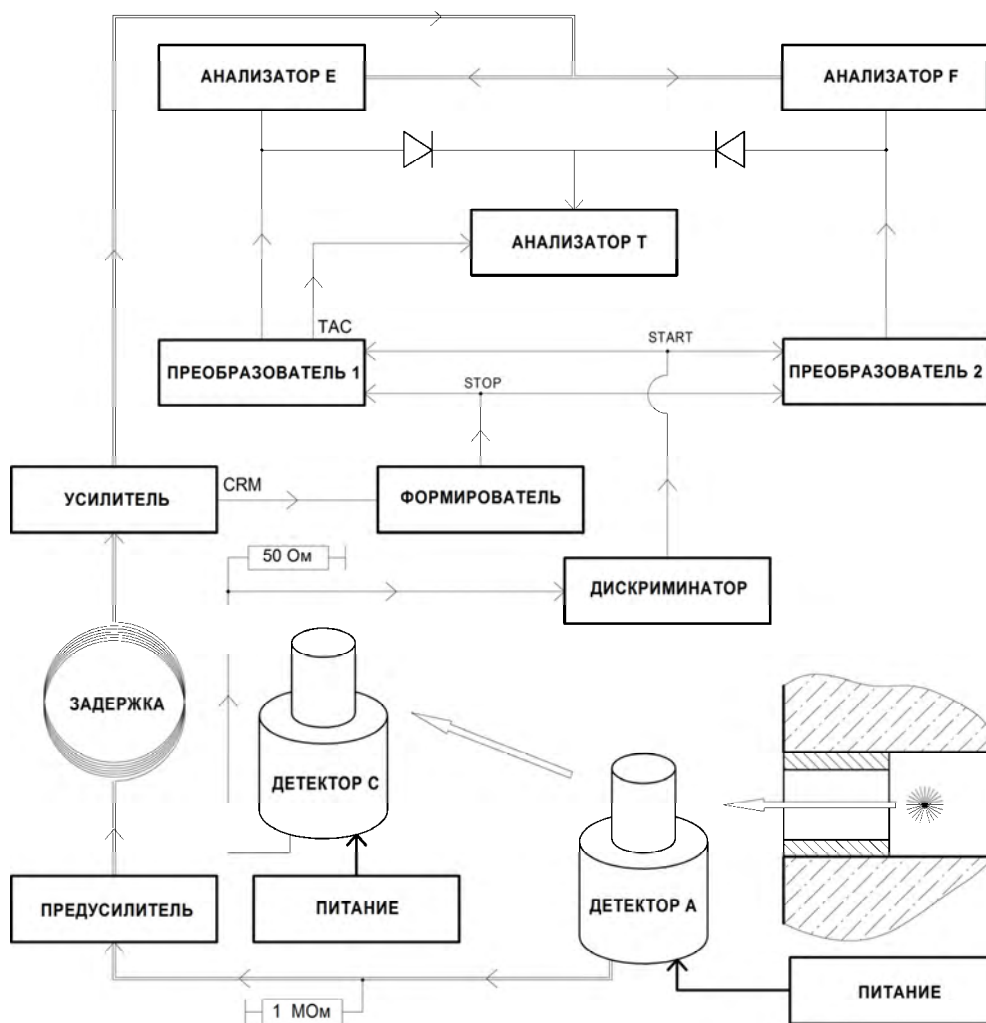


Рис. 2. Схема соединений измерительного оборудования

Время измерений для выбранного угла рассеяния составляло от 4000 до 10000 с. Каждый эксперимент завершался регистрацией контрольного распределения амплитуд импульсов с анализирующего детектора при выключенном управлении "GATE". Время контрольных измерений составляло 200 с. Контрольные измерения выполнялись для учета дрейфа коэффициента усиления ФЭУ (в пределах 2 %), происходившего во время экспериментов. Полученные контрольные распределения были использованы для приведения всех результатов к единому масштабу шкалы амплитуд (по номеру канала анализатора).

Результаты измерений

Для единичного акта комптоновского рассеяния, энергия, передаваемая электронам в сцинтилляторе, связана с выбранным углом рассеяния следующим соотношением [5, 6, 9]:

$$E_e = E_\gamma \sqrt{1 + \frac{M/E_\gamma}{1 - \cos \theta}}, \quad (1)$$

где E_e – энергия электрона отдачи; E_γ – энергия налетающего гамма-кванта; θ – угол рассеяния гамма-кванта относительно первоначального направления движения; $M = 0,511$ МэВ – энергия, соответствующая массе покоя электрона.

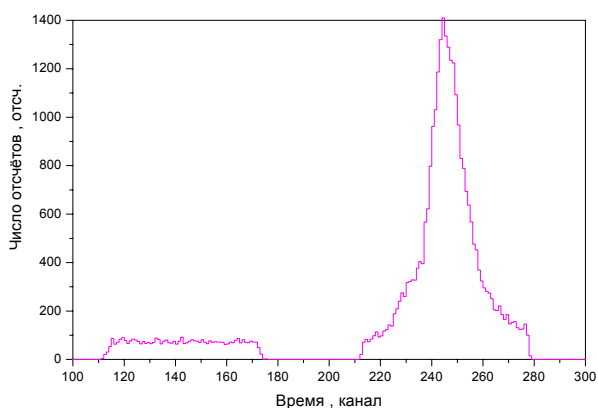


Рис. 3. Временное распределение импульсов для угла 15°

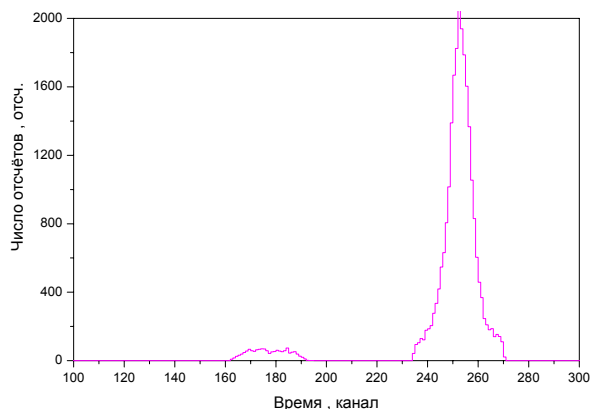


Рис. 5. Временное распределение импульсов для угла 30°

При обработке результатов измерений, расчет по формуле (1) выполнялся для каждого из двух значений энергии гамма-квантов радиоизотопного источника (1,173 и 1,333 МэВ); среднее двух значений принималось в качестве оценки энергии, переданной электронам сцинтиллятора.

Зарегистрированные распределения представлены на рис. 3–18. На графиках временных распределений импульсов показано число отсчетов в фоновом окне и число отсчетов в рабочем окне. На каждом графике распределений амплитуд импульсов: белыми символами показано распределение, соответствующее фоновому окну (случайные совпадения); черными символами – распределение, соответствующее рабочему окну; сплошной линией показан результат сглаживания. Уровень фона случайных совпадений, полученный в фоновом окне, в среднем составил менее 10 % от числа событий в пике рабочего окна.

При анализе распределений амплитуд импульсов предполагалось, что световыходу сцинтиллятора соответствует положение максимума пика на шкале каналов (с поправкой на коэффициент усиления). Для нахождения положения максимума на распределении амплитуд импульсов были использованы результаты сглаживания (усреднения по 25 точкам). Результаты обработки измерений приведены в таблице.

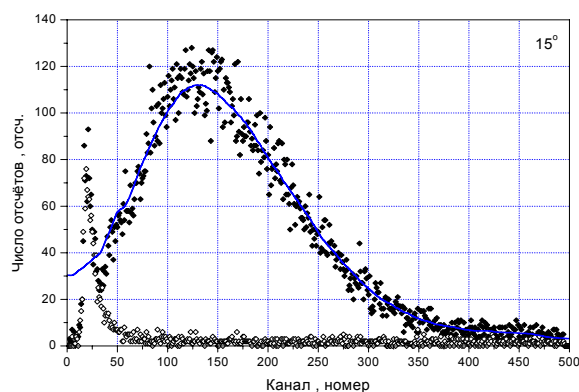


Рис. 4. Распределения амплитуд импульсов двух окон для угла 15°

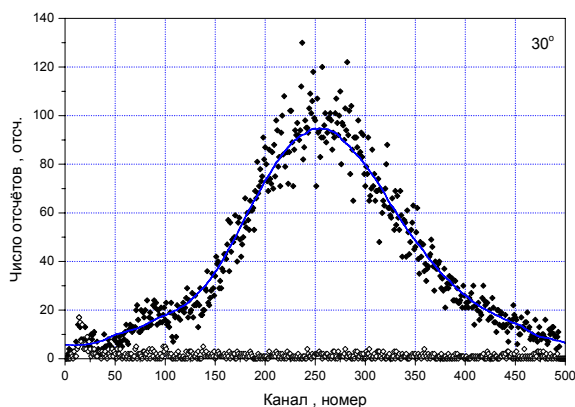


Рис. 6. Распределения амплитуд импульсов двух окон для угла 30°

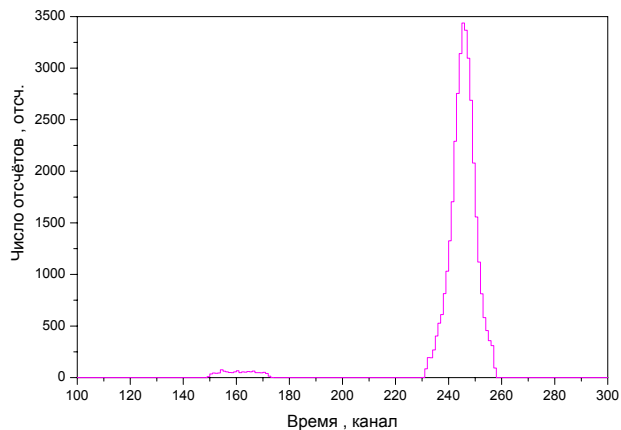


Рис. 7. Временное распределение импульсов для угла 45°

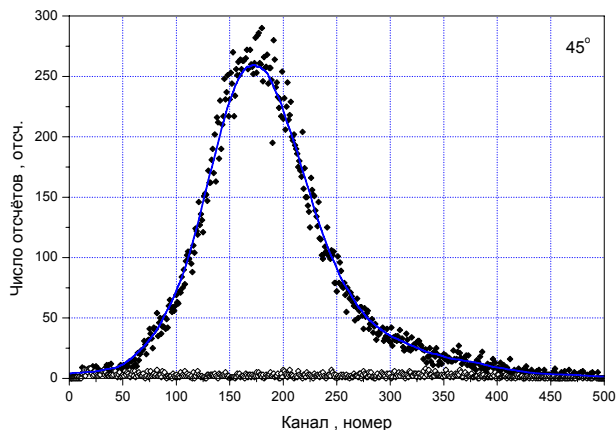


Рис. 8. Распределения амплитуд импульсов двух окон для угла 45°

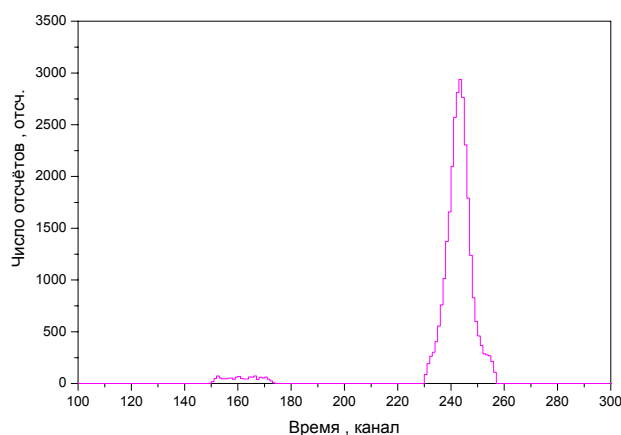


Рис. 9. Временное распределение импульсов для угла 60°

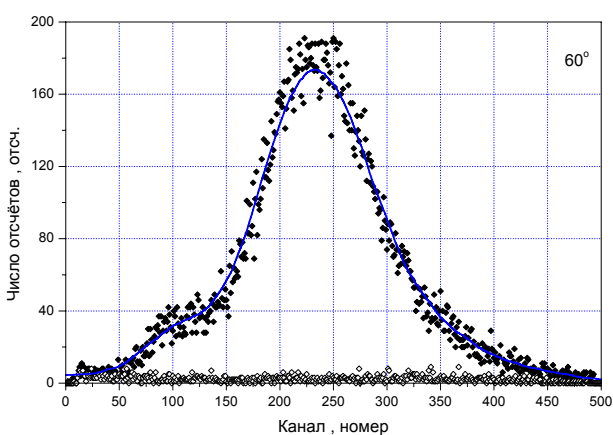


Рис. 10. Распределения амплитуд импульсов двух окон для угла 60°

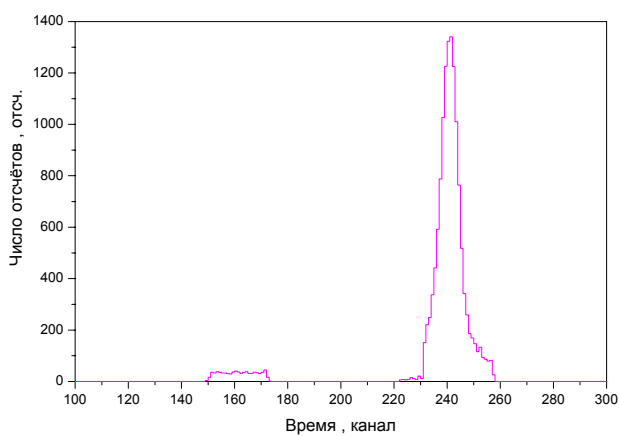


Рис. 11. Временное распределение импульсов для угла 75°

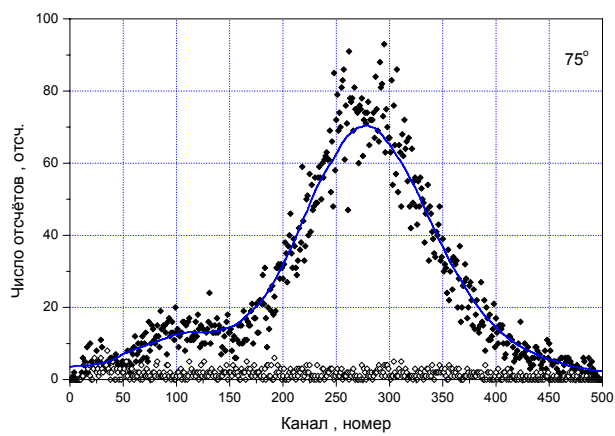


Рис. 12. Распределения амплитуд импульсов двух окон для угла 75°

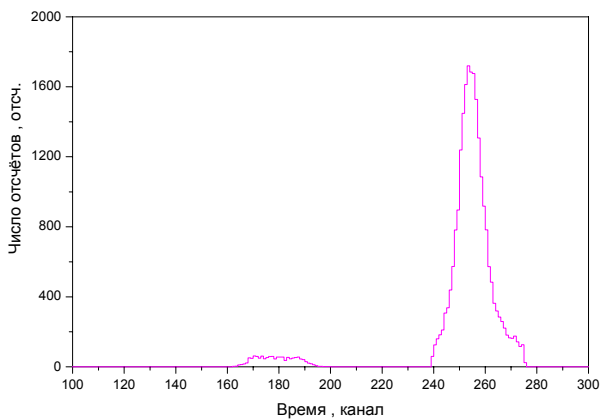


Рис. 13. Временное распределение импульсов для угла 90°

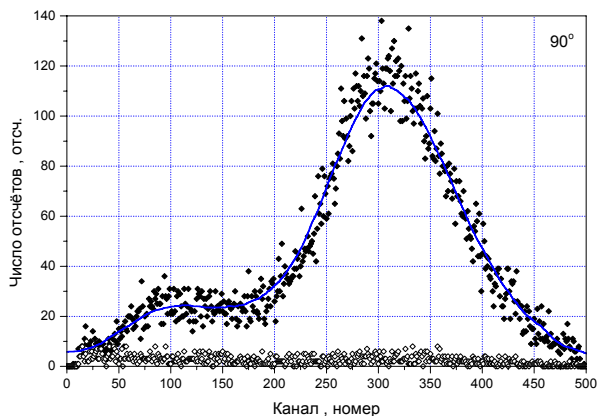


Рис. 14. Распределения амплитуд импульсов двух окон для угла 90°

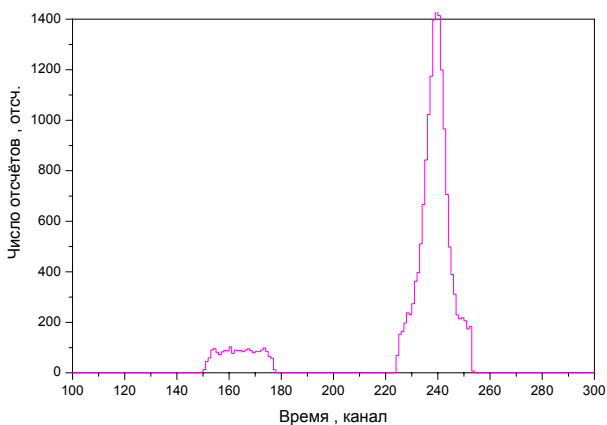


Рис. 15. Временное распределение импульсов для угла 120°

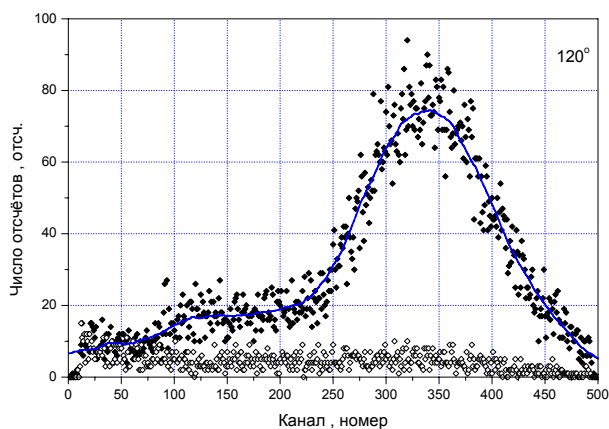


Рис. 16. Распределения амплитуд импульсов двух окон для угла 120°

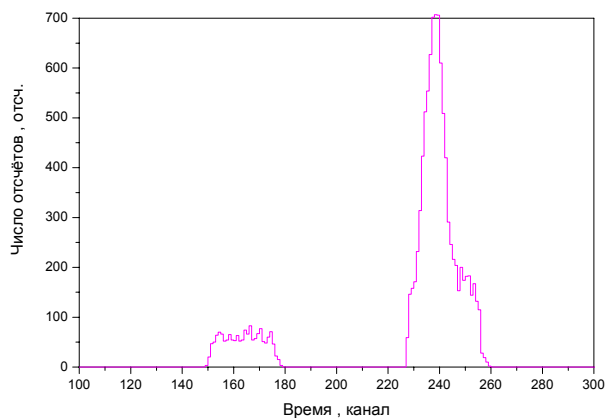


Рис. 17. Временное распределение импульсов для угла 150°

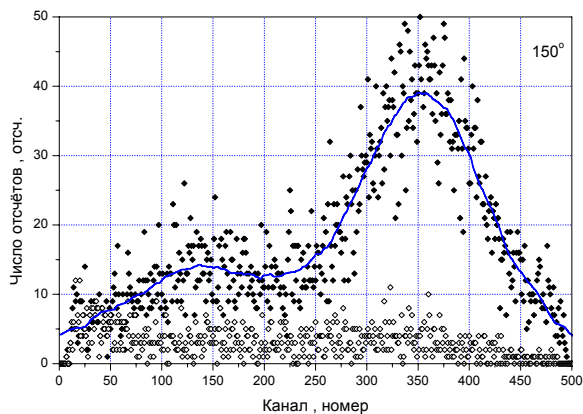


Рис. 18. Распределения амплитуд импульсов двух окон для угла 150°

Результаты обработки измерений

Угол θ . градус	15	30	45	60	75	90	120	150
Средняя энергия E_c , МэВ	0,0970	0,3106	0,5245	0,6907	0,8087	0,8903	0,9853	1,0284
Усиление, отн. ед.	100	50	20	20	20	20	20	20
Максимум, канал	131	255	174	233	278	309	339	354
Световойход S , канал	26,2	102,0	174,9	233,0	278,0	304,4	339,0	354,0
Аппроксимация, канал	25,8	101,0	176,3	234,8	276,3	305,1	338,5	353,7

Необходимо отметить, что попытка использования функции Гаусса для описания анализируемых распределений не обеспечила приемлемую точность аппроксимации из-за ассиметрии пиков и наличия наклонного "пьедестала". Число событий, формирующих "пьедестал" пика, не менее чем в 2 раза превышает число случайных совпадений в фоновом временном окне. Происхождение "пьедестала" может быть связано с краевыми эффектами и с многократным рассеянием гамма-квантов в сравнительно большом объеме анализирующего детектора: при рассеянии гамма-кванта вблизи поверхности сцинтиллятора, электрон отдачи может вылететь через эту поверхность, оставив в сцинтилляторе не всю свою энергию; часть рассеянных гамма-квантов, прежде чем попасть в управляющий детектор могут испытать в анализирующем детекторе еще один акт рассеяния, при этом суммарная энергия, переданная электронам отдачи, может превысить результат однократного рассеяния.

Полученная зависимость относительного световыхода (в единицах номеров канала анализатора) от энергии, переданной электронам сцинтиллятора, была аппроксимирована линейной функцией (по методу наименьших квадратов). Зависимость относительного световыхода от энергии электронов приведена на рис. 19.

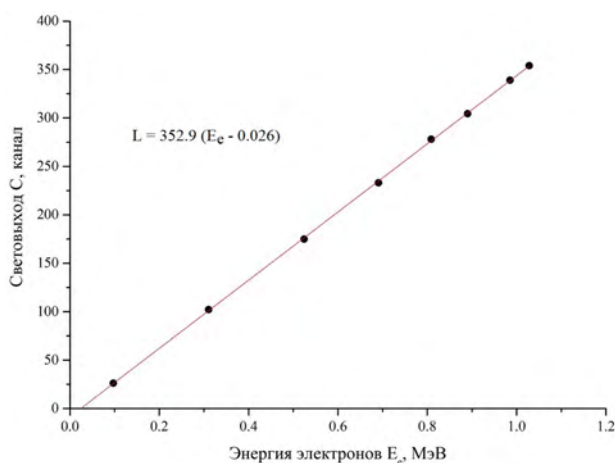


Рис. 19. Зависимость относительного световыхода от энергии электронов

Различие между экспериментальными значениями и аппроксимирующей линией не превышает 1,5 %, что служит косвенным подтверждением корректности выполненных измерений.

Зависимость световыхода сцинтиллятора от природы ионизирующей частицы определяется тем, что сильноионизирующие частицы вдоль своего трека создают локальные электрические поля, которые приводят к росту нерадиационных переходов в возбужденных молекулах (к тушению сцинтилляций) и, соответственно, к уменьшению световыхода.

Анализ полученных результатов показал линейную зависимость световыхода от энергии электронов в диапазоне от 0,09 до 1,02 МэВ:

$$L \approx \alpha_e (E_e - \Delta_e), \quad (2)$$

где $\alpha_e = 352,9$ канал/МэВ – масштабный множитель; $\Delta_e = 0,026$ МэВ – параметр смещения.

Полученные данные согласуются с результатами аналогичных экспериментов [5, 8, 15, 16] и подтверждают данные о линейности световыхода при энергиях электронов отдачи выше 0,1 МэВ. В частности, в одной из цитируемых статей [8] результаты представлены в виде прямой линии с параметром смещения порядка 0,070 МэВ; в другой аналогичной работе [15] световыход описан линейной зависимостью с параметром смещения 0,009 МэВ.

Заключение

Разработан и отлажен стенд для исследования световыхода сцинтилляционных детекторов. Для сцинтиллятора на основе полистирола в диапазоне энергий электронов от 0,1 до 1,0 МэВ подтверждена линейность зависимости световыхода.

Измерительный стенд планируется применить для исследования световыхода органического сцинтиллятора из полистирола от энергии протонов в эксперименте с генератором ДТ-нейтронов. В экспериментах с нейтронами [4, 5, 8] используется однозначная связь между углом рассеяния нейтрона и энергией, переданной протону отдачи [5]:

$$E_p \approx E_n (1 - \cos^2 \theta), \quad (3)$$

где E_p – энергия протона отдачи; E_n – энергия налетающего нейтрона; θ – угол рассеяния нейтрона относительно первоначального направления движения.

Литература

1. Акимов Ю. К. Детекторы ядерных излучений на основе пластических сцинтилляторов // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1994. Т. 25. С. 496.
2. Харжеев Ю. Н. Сцинтилляционные счетчики в современных экспериментах по физике высоких энергий // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2015. Т. 46. С. 1124.
3. Britvich G. I., Brekhovskikh V. V., Semenov V. K., Kholodenko S. A. The main characteristics of polystyrene scintillators produced at the Institute of High-Energy Physics and detectors on their basis // Instruments and Experimental Techniques. 2015. Vol. 58. P. 211.
4. Smith D. L., Polk R. G., Miller T. G. Measurement of the response of several organic scintillators to electrons, protons and deuterons // Nuclear Instruments and Methods. 1968. Vol. 64. P. 157.

5. Кулинич Ю. А. Рукавишников В. Г. Измерение зависимости световыхода сцинтилляционных кристаллов от энергии излучения // Приборы и техника эксперимента. 1971. № 5. С. 79.
6. Варганов Н. А. Самойлов П. С. Прикладная сцинтилляционная гамма-спектрометрия // М.: Атомиздат. 1975.
7. Valentine J. D., Rooney B. D. Design of a Compton spectrometer experiment for studying scintillator non-linearity and intrinsic energy resolution // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1994. Vol. A353. P. 37.
8. Chen J. R., Yuan L. J., Hsu W. S., Liu Y. C. Electron light output and proton light output in a NE-213 liquid scintillator // Chinese Journal of Physics. 1982. Vol. 20. P. 75.
9. Beretta M., Capelli S., Gironi L., Previtali E., Sisti M. Non proportionality dependence on shaping time // Journal of Instrumentation. 2017. Vol. 12. P. P04007.
10. Choong W. S., Vetter K. M., Moses W. W., Hull G., Payne S. A., Cherepy N. J., Valentine J. D. Design of a facility for measuring scintillator non-proportionality // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2008. Vol. 55. P. 1753.
11. Ugorowski P. B., Harrison M. J., McGregor D. S. Design and performance of a Compton-coincidence system for measuring non-proportionality of new scintillators // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2010. Vol. A615. P. 182.
12. Swiderski L., Marcinkowski R., Szawlowski M., Czarnacki W., Syntfeld-Kazuch A., Szczesniak T., Pausch G., Plettner C., Roemer K. Non-proportionality of electron response and resolution of Compton electrons in scintillators // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2012. Vol. 59/ P. 222.
13. Swiderskii L., Marcincowski R., Moszynski M., Czarnacki W., Szawlowski M., Szczesniak T., Pausch G., Plettner C., Roemer K. Electron response of some low-Z scintillators in wide energy range // Journal of Instrumentation. 2012. Vol. 7. P. P06011.
14. Берковский А. Г., Веретенников А. И., Козлов О. В. Вакуумные фотоэлектронные приборы // М.: Энергоатомиздат. 1982.
15. Hirschberg M., Beckmann R., Brandenburg U., Bruckmann H., Wick K. Precise measurement of Birks kB parameter in plastic scintillators // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1992. Vol. 39. P 511.
16. Dietze G. Energy calibration of the NE-213 scintillation counters by gamma-rays // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1979. Vol. 26. P. 398.