

УДК 539.1.08

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА ОТ ВРЕМЕНИ РАЗВИТИЯ АМПЛИТУДНОГО ИМПУЛЬСА

В. А. Басков

Исследована зависимость энергетического разрешения и эффективность регистрации сцинтилляционного детектора от времени развития амплитудного импульса при прохождении через детектор космических мюонов. Обнаружено, что энергетическое разрешение можно повысить за счет временной привязки к быстрой или медленной компоненте развития импульса с потерей эффективности регистрации. В точке ~ 11 нс от начала развития импульса энергетическое разрешение исследованного детектора улучшилось на $\sim 24\%$, эффективность регистрации ухудшилась на $\sim 28\%$, соответственно.

Ключевые слова: сцинтилляционный детектор, эффективность регистрации, энергетическое разрешение, время развития импульса.

Энергетическое разрешение и эффективность регистрации относятся к основным характеристикам детекторов и показывают возможные диапазоны их применения. Эти характеристики между собой связаны, поскольку определяются откликом детектора [1]. В экспериментах, как правило, необходимо иметь оптимальное соотношение между энергетическим разрешением и эффективностью регистрации. В зависимости от решаемой задачи и технических возможностей активность экспериментаторов направляется на усиление одной характеристики в ущерб другой. Обычно выделяют и изменяют параметр или несколько параметров детектора, наиболее сильно влияющих на энергетическое разрешение и эффективность регистрации. Это могут быть геометрические размеры детектора, тип применяемых фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), напряжения питания делителей ФЭУ и т. д. Однако в практической деятельности возникают ситуации, когда исчерпаны методы улучшения энергетического разрешения детектора.

Тем не менее, существуют параметры детектора, которые определяются внутренними физическими процессами, оказывающие влияние на энергетическое разрешение и эффективность регистрации, например, время формирования импульса. Такие параметры называют “аппаратурными” [3]. В наиболее используемых в экспериментальных исследованиях пластмассовых сцинтилляторах интенсивность и длительность световых вспышек определяется концентрацией сцинтиллирующего вещества и его физическими и химическими свойствами, а форма световой вспышки описывается двумя экспонентами [4].

Настоящая работа посвящена изучению влияния на относительное энергетическое разрешение и эффективность регистрации частиц детектором быстрой и медленной компонент процесса формирования амплитудного импульса.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Космические мюоны проходили через систему, состоящую из трех сцинтилляционных счетчиков S_1 , S_2 и S . Счетчики S_1 и S_2 являлись триггерными счетчиками, формировавшими стартовый сигнал, и имели размер $18 \times 18 \times 5$ мм³. Счетчик S являлся исследуемым детектором на основе широко применяемого в экспериментальных установках полистирола, произведенного в Харькове. Размер счетчика составлял $50 \times 70 \times 25$ мм³. Объем счетчика S “просматривался” двумя фотоэлектронными умножителями ФЭУ-85 непосредственно без смазки плотно прижатыми к противоположным граням размером 50×25 мм² (каналы S_3 и S_4). Напряжения питания делителей S_3 и S_4 составляли $U_{S3} = U_{S4} = 1000$ В. Счетчики S_1 и S_2 были расположены по центру счетчика S сверху и снизу (рис. 1). Расстояние между S_1 и S_2 составляло 35 мм. Рабочие характеристики системы триггерных счетчиков S_1 и S_2 были выставлены стандартным методом [3].

Сигналы с S_1 и S_2 длительностью $t_1 = t_2 = 10$ нс подавались на формирователи Ф1 и Ф2 с постоянным порогом (пороговое напряжение обоих формирователей составляло $U_{\text{пор1}} = U_{\text{пор2}} = 11$ мВ) и далее через задержки З1 и З2 подавались на схему совпадений СС1. Сигнал СС1 длительностью $t_{12} = 10$ нс через задержку З3 подавался на схему совпадения СС2, на второй канал которой через задержку З4 приходил сформированный формирователем Ф3 ($U_{\text{пор3}} = 10$ мВ) сигнал с исследуемого сцинтиллятора (канал S_3) длительностью также $t_3 = 10$ нс. Сигнал с СС2 являлся сигналом “Start” для запуска блока зарядо-цифрового преобразователя (ЗЦП), с помощью которого через крейт-контролер системы САМАС производилась “запись” сигнала со сцинтиллятора (канал S_4) в память персонального компьютера ПК.

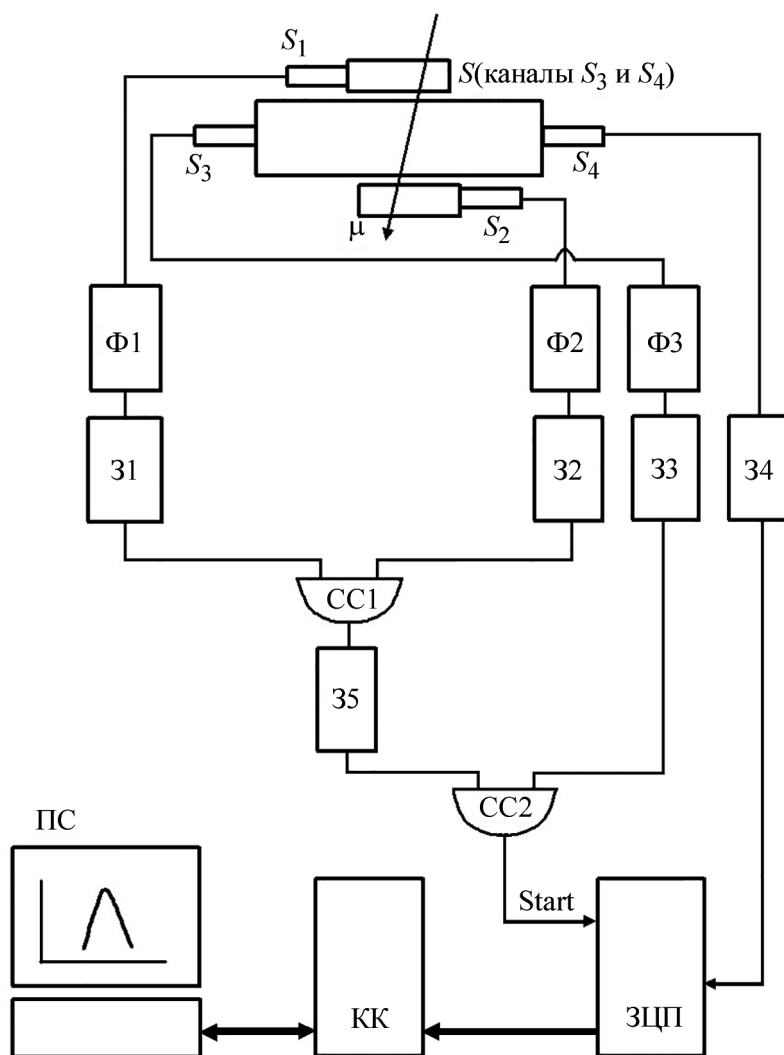


Рис. 1: Схема экспериментальной установки (S_1, S_2, S (каналы S_3 и S_4) – сцинтилляционные счетчики; $\Phi 1, \Phi 2$ и $\Phi 3$ – формирователи; $31-35$ – задержки; $CC1$ и $CC2$ – схемы совпадений; ЗЦП – зарядо-цифровой преобразователь; КК – крейт-контроллер системы САМАС; ПС – персональный компьютер).

Надо отметить, что в данной схеме установки для одновременного измерения времени (канал S_3) и амплитуды (канал S_4) сигнала использовались два ФЭУ. Это сделано для того, чтобы исключить искажение сигнала по амплитуде или по форме при одновременном снятии сигнала с одного ФЭУ, например, с помощью пассивного линейного разветвителя или одновременного снятия сигнала с анода и предпоследнего динода ФЭУ [5, 6]. Схема установки, использующая два и более ФЭУ, позволяет в полной ме-

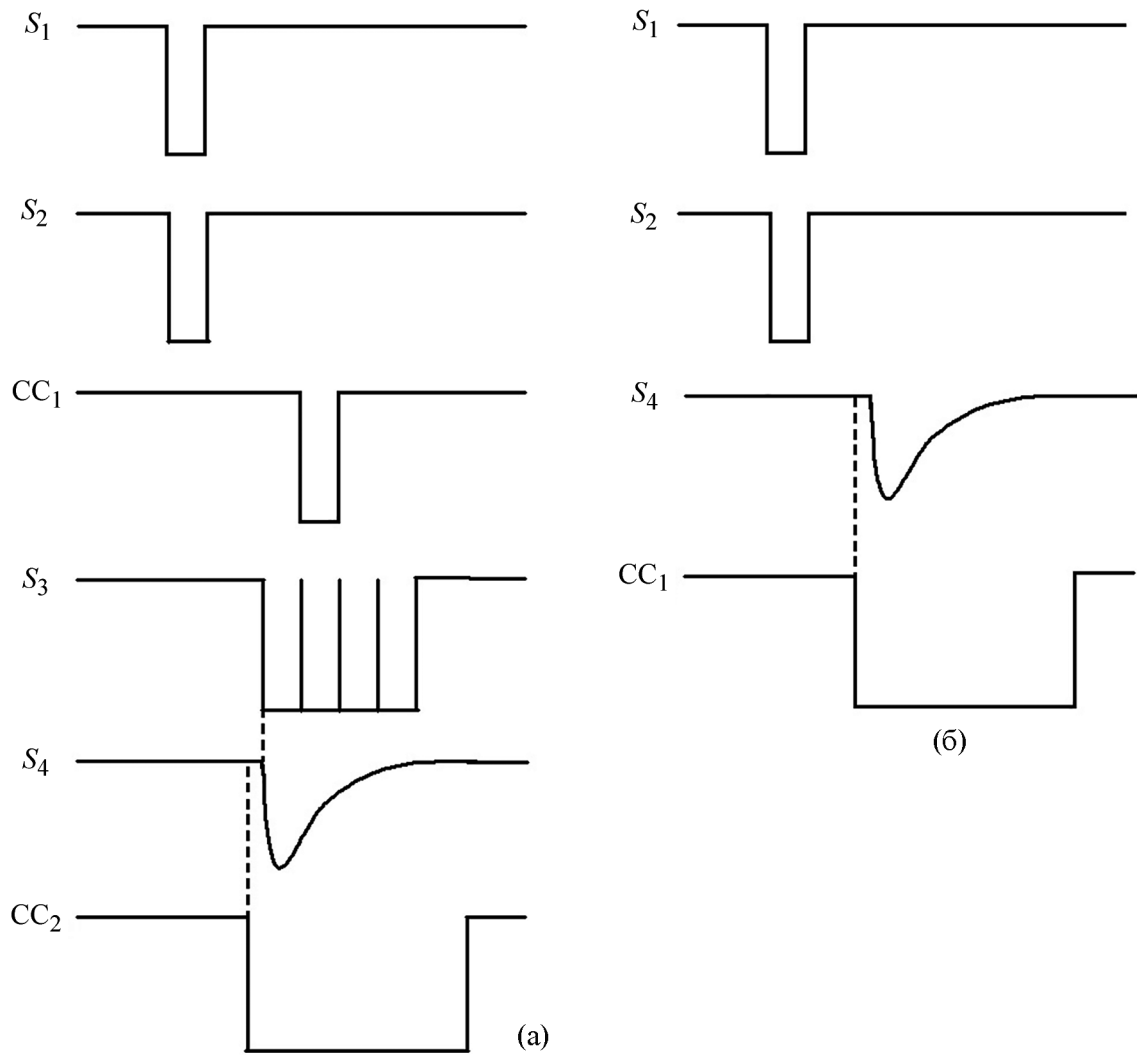


Рис. 2: Временные гистограммы сигналов со счетчиков S_1, S_2, S (каналы S_3 и S_4) и CC_1 и CC_2 : (а) временные гистограммы регистрации сигнала, примененные в данном методе исследования; (б) временные гистограммы при стандартном методе регистрации сигнала.

ре использовать максимальную амплитуду и форму сигнала, формируемого системой ФЭУ-делитель, являющиеся отражением процесса образования сигнала в сцинтилляторе при прохождении через него заряженной частицы.

Размер триггерных счетчиков S_1 и S_2 был выбран меньший по сравнению с размером исследуемого счетчика S с целью более однородного энерговыделения вертикальным потоком мюонов в S в диапазоне телесных углов, определяемом размерами триггерных

счетчиков и расстоянием между ними. Оценка показала, что доля заряженных частиц от широких атмосферных ливней и мюонов, пришедших под большими углами и давших одновременно сигналы в S_1, S_2 , и S в каждой точке измерений, составила менее 1% и существенно не должна влиять на результаты измерений.

На рис. 2(а) представлены временные гистограммы сигналов с S_1, S_2, CC_1, CC_2 и S (каналы S_3 и S_4). Сигнал со сцинтиллятора (канал S_3) длительностью $t_{\text{сц}} \sim 35$ нс и амплитудой в максимуме сигнала ~ 200 мВ, проходя через формирователь ФЗ, фактически стробируется. Действительно, за время “прохождения” сигнала через формирователь ФЗ формирование стандартного сигнала происходит за время, определяемое временем формирования (в данном случае $t_3 = 10$ нс). В этом случае мертвое время t_M между импульсами очень мало ($t_M \ll t_3$), поскольку после окончания одного сформированного импульса начинается следующий, так как уровень сигнала со сцинтиллятора в максимуме развития после первого сформированного импульса выше порога формирования $U_{\text{сц}} = 200$ мВ $>$ $U_{\text{порз}}$. Изменяя величины задержек ЗЗ и З4 можно с помощью сигнала со схемы совпадений CC_1 выбрать любую точку сигнала канала S_3 , подаваемого на второй вход CC_2 . Для сравнения на рис. 2(б) приведены гистограммы сигналов стандартной схемы.

Таким образом, для каждого соотношения задержек ЗЗ и З4 можно определять эффективность регистрации ε частиц и относительное энергетическое разрешение δ пластического сцинтиллятора. Эффективность регистрации ε определялась как $\varepsilon = N_{123}/N_{12}$, где N_{12} – число совпадений сигналов счетчиков S_1 и S_2 ; N_{123} – совпадений сигналов счетчиков S_1, S_2 и S_3 . Энергетическое разрешение детектора определялось как $\delta = (\Delta A / \langle A \rangle) / 2.35 \cdot 100\%$, где ΔA – полная ширина на половине высоты амплитудного спектра, снимаемого с детектора; $\langle A \rangle$ – среднее энерговыделение в детекторе; $2.35 = 2 \cdot (\ln 2) \cdot \sqrt{2}$ [2, 3].

На рис. 3 показаны зависимости δ (а) и ε (б) при изменении задержки t_{123} между сигналом, идущим со схемы совпадений CC_1 , и сигналом со счетчика S_3 . Видно, что поведение ε и δ качественно одинаково и в целом повторяет форму развития временного импульса в сцинтилляционном счетчике: рост (быстрая компонента развития импульса), достижение максимума (перекрывание быстрой и медленной компонент) и спад (медленная компонента развития импульса). Плато в максимуме изменения ε и δ длительностью ≈ 4 нс говорит об эффективной работе схемы совпадений CC_2 [3]. Максимум обеих функций достигается при одной и той же величине задержки $t_{123} \approx 5$ нс от начала развития импульса (быстрая компонента развития сигнала), при этом ε растет от

нулевой величины до ≈ 0.7 , а затем ухудшается и достигает величины $\approx 14\%$. Ухудшение δ в диапазоне времен развития импульса до максимума от 1 нс до 5 нс составляет $\approx 11\%$ относительно максимума. Напротив, за максимумом развития импульса (медленная компонента развития ливня) δ улучшается, а ε детектора ухудшается. В точке развития импульса ~ 11 нс (за максимумом развития импульса) δ улучшилось на $\sim 24\%$ относительно величины в максимуме при ухудшении ε на $\sim 28\%$, соответственно. Энергетическое разрешение детектора лучше до и после максимума развития сигнала, при ухудшении величины эффективности регистрации.

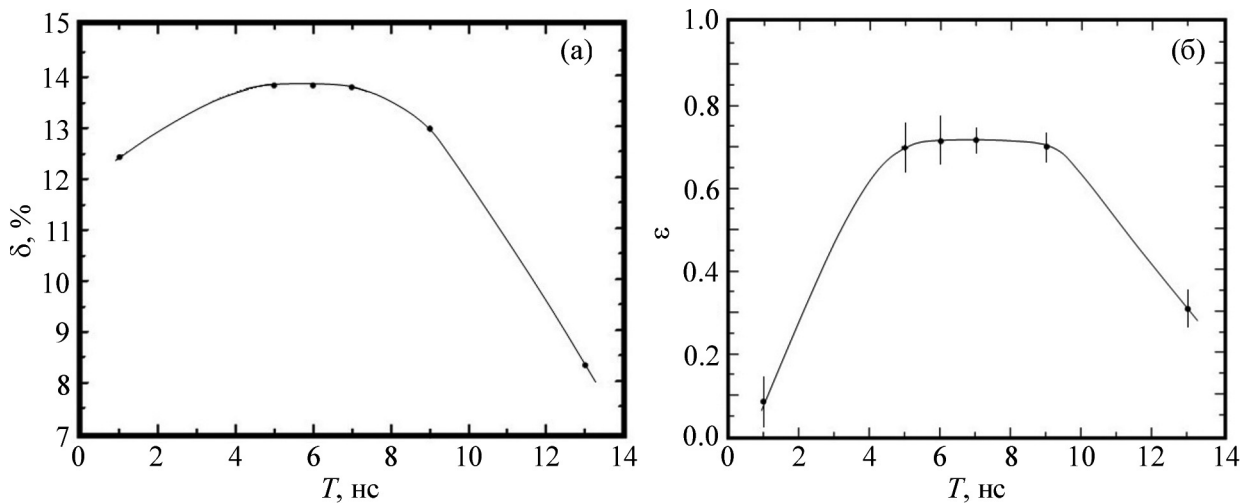


Рис. 3: Зависимость относительного энергетического разрешения сцинтилляционного детектора δ (а) и эффективности регистрации космических мюонов ε (б) от времени развития импульса T .

Соотношение ε и δ в процессе развития импульса на основании данных рис. 3 представлено на рис. 4. Видно, что соотношение ε и δ имеет две ветви: до максимума развития импульса (верхняя ветвь) и за максимумом развития импульса (нижняя ветвь). Рис. 4 показывает, что при одинаковой эффективности регистрации частиц ε относительное энергетическое разрешение δ детектора в случае затухания импульса лучше, чем в начале развития.

Если регистрация импульса со счетчика S идет по стандартной схеме, представленной на рис. 2(б), при которой сигнал с канала S_3 из триггера исключается, то эффективность регистрации максимальная ($\varepsilon \sim 0.7$), а энергетическое разрешение имеет наихудшую величину ($\delta \sim 14\%$).

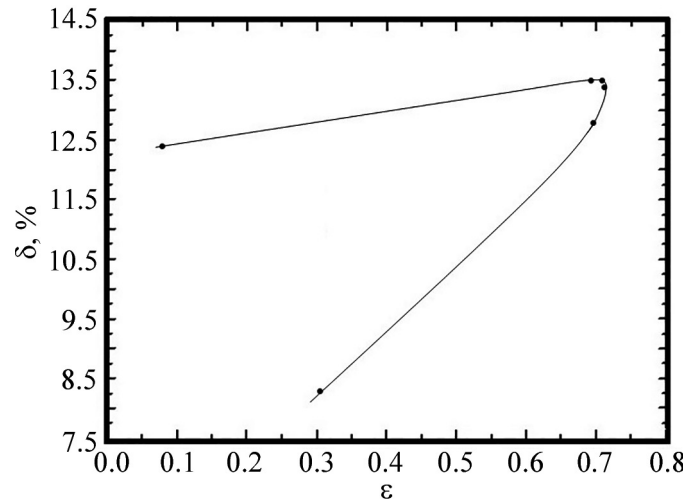


Рис. 4: Соотношение между относительным энергетическим разрешением δ и эффективностью регистрации ε сцинтилляционного детектора в зависимости от времени развития импульса T .

Надо отметить, что амплитудный разброс, определяемый угловым разбросом при прохождении через детектор космических мюонов, влияет на энергетическое разрешение. При данных размерах триггерных счетчиков эффект улучшения энергетического разрешения детектора в привязке его ко времени развития импульса оказался небольшой. В работе он составил $\sim 7\%$ до максимума развития импульса и $\sim 20\%$ за максимумом развития импульса относительно величины в максимуме. Эффект улучшения энергетического разрешения должен существенно увеличиться при регистрации детектором частиц монохроматического пучка, например, электронов. Это связано с более однородным энерговыделением в детекторе, который обусловлен небольшим угловым разбросом в пучке.

Можно предположить, что численные значения δ и ε будут меняться при изменении размеров счетчика S и, в первую очередь, его толщины. Действительно, толщина счетчика S , через который проходили мюоны, равнялась 2.5 см, и энерговыделение мюонов составляло в среднем $\langle E \rangle = k \cdot L \approx 2 \cdot 2.5 = 5$ МэВ, где $k = \Delta E / \Delta x$ ($\Delta E / \Delta x$ – средняя величина ионизационных потерь электронов на единицу пути в детекторе, для полистирола $\Delta E / \Delta x \approx 2$ МэВ/см); L – толщина сцинтилляционного детектора [1, 2]. При увеличении или уменьшении L энерговыделение в счетчике, соответственно, будет либо увеличиваться, либо уменьшаться. Это может приводить соответственно к изменению временных и амплитудных характеристик импульса с делителя ФЭУ счетчика

S , что должно сказаться на временных продолжительностях фаз развития импульса, на которых происходят изменения δ и ε [1–3]. Однако такое предположение требует дополнительных исследований.

Некоторые способы получения необходимых параметров детекторов с использованием быстрой или медленной компоненты развития импульса, формирующегося при регистрации частицы, известны и применяются. Например, в обзоре [7] обсуждаются возможности разделения нейтронов от гамма-фона по форме медленной компоненты развития импульса.

Таким образом, можно сделать вывод, что в процессе развития импульса, возникающего в детекторе от прохождения через него частицы, меняются параметры детектора, влияющие на эффективность регистрации и энергетическое разрешение. В случаях, когда исчерпаны все конструктивные возможности улучшения энергетического разрешения детектора, точность определения энергии можно повысить за счет временной привязки к быстрой или медленной компоненте развития импульса с потерей эффективности регистрации. Можно предположить, что данный эффект присущ всем типам детекторов, независимо от эффектов, формирующих импульсы (ионизационных, черенковских и т. д.).

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (NISA – РФФИ) № 18-02-40061 и № 18-02-40079.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] А. И. Абрамов, Ю. А. Казанский, Е. С. Матусевич, *Основы экспериментальных методов ядерной физики* (М., “Энергоатомиздат”, 1985).
- [2] В. К. Ляпидевский, *Методы детектирования излучений* (М., “Энергоатомиздат”, 1987).
- [3] Ю. К. Акимов, *Сцинтилляционные методы регистрации частиц больших энергий* (М., Издательство МГУ, 1963).
- [4] М. Н. Медведев, *Сцинтилляционные детекторы* (М., Атомиздат, 1977).
- [5] С. В. Афанасьев, Л. Я. Жильцова, В. И. Колесников и др., *Краткие сообщения ОИЯИ*, №1[81]-97, 45-64, 1997.
- [6] Е. В. Платыгина, *Материалы научно-практической конференции, посвященной 187 годовщине образования СПбГТИ(ТУ)* (3-4 декабря 2015 г.), Издательство СПбГТИ(ТУ), С. 177, 2015.

- [7] Horst Klein and Frank D. Brooks, Scintillation detectors for fast neutrons, International Workshop on Fast Neutron Detectors University of Cape Town, South Africa, April 3–6, 2006 (PoS(FNDA2006)097); <http://pos.sissa.it/025/097/pdf>.

Поступила в редакцию 22 марта 2021 г.

После доработки 6 апреля 2021 г.

Принята к публикации 7 апреля 2021 г.