

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕЙТРОНОВ В НЕОРГАНИЧЕСКИХ СЦИНТИЛЛЯТОРАХ НА ОСНОВЕ ZnS

© 2021 г. П. С. Кузьменкова^а*, Д. М. Громушкин^а, Т. Д. Третьякова^а, И. А. Шульженко^а

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

*E-mail: PSKuzmenkova@mephi.ru

Поступила в редакцию 03.03.2021 г.

После доработки 11.05.2021 г.

Принята к публикации 12.05.2021 г.

В работе приводится сравнение трех методов идентификации нейтронов в сцинтилляторах на основе ZnS с примесями ${}^6\text{Li}$ и ${}^{10}\text{B}$: метод интегрирования заряда, анализ градиента импульса и упрощенный метод интегрирования заряда. Для сравнения используется показатель качества, вычисляющийся на основе распределения расстояний от координаты отображения события до кривой разделения. Показано, что наилучшее качество разделения обеспечивает метод интегрирования заряда.

Ключевые слова: неорганические сцинтилляторы, идентификация нейтронов, разделение по форме импульса

DOI: 10.56304/S2079562920060366

1. ВВЕДЕНИЕ

Регистрация нейтронов важна для многих прикладных и фундаментальных областей, таких как ядерная и радиационная безопасность, учет и контроль ядерных материалов, физика элементарных частиц и астрофизика. Для измерения потока нейтронов особый интерес представляют тонкие сцинтилляторы на основе ZnS с примесями ${}^6\text{Li}$ или ${}^{10}\text{B}$. Это связано с их нечувствительностью к гамма-фону, а также возможностью разделения сигналов от различных частиц по форме импульса. Существуют различные способы идентификации нейтронов, включающие использование аналоговых интегрирующих цепочек [1–4], численных преобразований исходных сигналов [5–11], а также методов машинного обучения [12].

Целью настоящей работы является определение эффективного метода идентификации нейтронов при использовании численных преобразований сигналов для неорганических сцинтилляторов.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Экспериментальные данные для сравнения методов идентификации нейтронов были получены на стенде, схема которого представлена на рис. 1. Стенд состоит из светонепроницаемого корпуса, фотоэлектронного умножителя ФЭУ-200, цифрового осциллографа Rohde & Schwarz RTM3000 и источника нейтронов ${}^{252}\text{Cf}$.

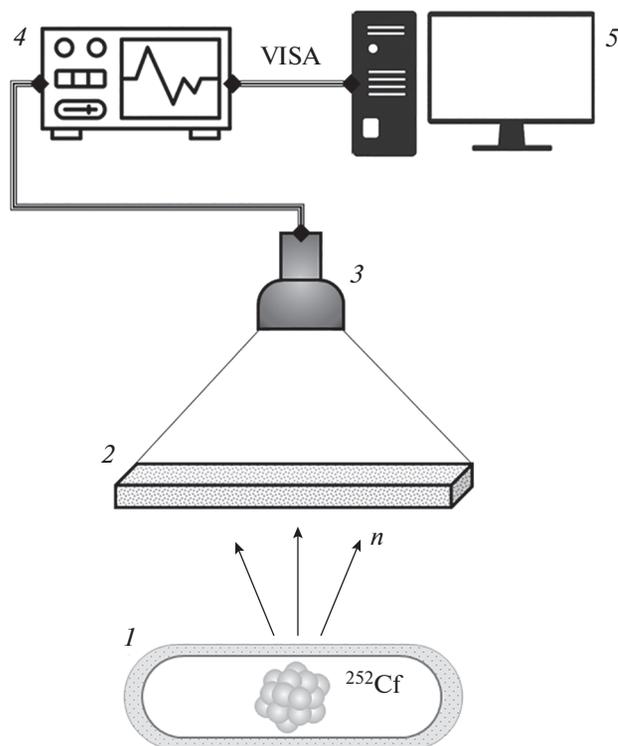


Рис. 1. Схема стенда: 1 – источник нейтронов ${}^{252}\text{Cf}$ с замедлителем; 2 – сцинтиллятор; 3 – ФЭУ-200; 4 – цифровой осциллограф Rohde & Schwarz RTM3000; 5 – персональный компьютер.

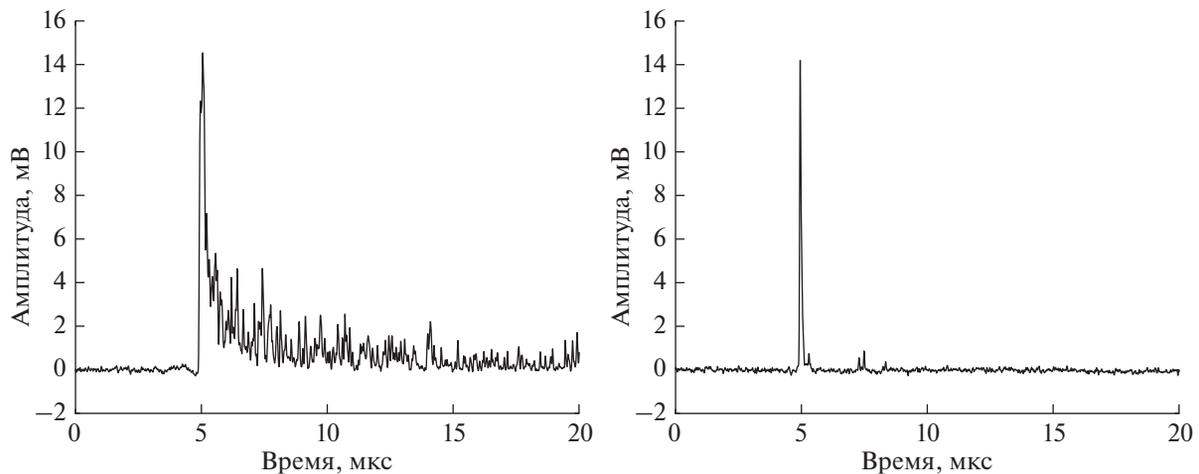


Рис. 2. Примеры типичных осциллограмм (слева – сигнал от нейтрона; справа – сигнал от релятивистской заряженной частицы).

В светонепроницаемый корпус помещались сцинтилляционные композиции на основе $\text{ZnS(Ag)/}^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ и $\text{ZnS(Ag)/}^6\text{LiF}$. Композиции представляют собой пластины площадью 100 см^2 , сформированные с использованием двухкомпонентного силиконового каучукового компаунда ELASTOSIL RT 601. Для увеличения доли регистрируемых нейтронов источник нейтронов ^{252}Cf в пластиковом замедлителе устанавливался вплотную к корпусу. Также проводились дополнительные измерения без использования сцинтиллятора.

При проведении измерений порог регистрации составлял 10 мВ при коэффициенте усиления ФЭУ 10^6 , а частота дискретизации 125 МГц . Полученные в результате регистрации частиц осциллограммы сохранялись и сглаживались при помощи фильтра Гаусса для уменьшения колебаний нулевой линии.

3. МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ

Импульс с детектора на основе сцинтиллятора ZnS с примесями ^6Li или ^{10}B может быть описан как сумма двух затухающих экспонент [13], которые называются быстрой и медленной компонентами сигнала. Интенсивности этих компонент зависят от типа зарегистрированных частиц: для тяжелых частиц характерна большая длительность импульса и большая интенсивность медленной компоненты, чем для легких. Это различие и служит основой всех методов разделения по форме импульса (рис. 2).

Методы разделения сигналов основаны на выборе и сопоставлении параметров, характеризующих форму импульса. Значения этих параметров используются для построения точечных диаграмм. Каждая точка на таких диаграммах соответствует

одному зарегистрированному сигналу. На диаграммах можно выделить области, одна из которых соответствует сигналам от нейтронов, а другая – сигналам от легких заряженных частиц или гамма-квантов. Границу между этими областями можно описать кривой, которая называется кривой разделения. Положение точек относительно кривой разделения служит условием классификации событий. В общем виде кривую разделения можно описать следующим образом:

$$f(x) = \begin{cases} C_y, & x \leq C_x \\ Kx + B, & x > C_x \end{cases} \quad (1)$$

В данной работе исследовались следующие методы: интегрирования заряда [5–9], анализа градиента импульса [6, 10] и упрощенного интегрирования заряда [6, 11].

Метод интегрирования заряда

Метод интегрирования заряда основан на разделении сигнала на два интервала: первый интервал полностью охватывает сигнал, а второй включает в себя только его медленную компоненту. На выбранных интервалах вычисляются значения интегралов сигнала, которые называются “полный интеграл” и “интеграл хвоста”. Значения пределов интегрирования зависят от конфигурации используемого оборудования и характеристик сигналов.

Для определения интервалов интегрирования используется распределение сигналов по ширине импульса (рис. 3). Шириной импульса называется время, за которое амплитуда сигнала становится сравнимой с уровнем нулевой линии после срабатывания триггерного условия. Большая часть сигналов от легких заряженных частиц имеет ширину импульса от 80 нс до локального минимума распределения ($\sim 0.7 \text{ мкс}$ на рис. 3). Для исключения

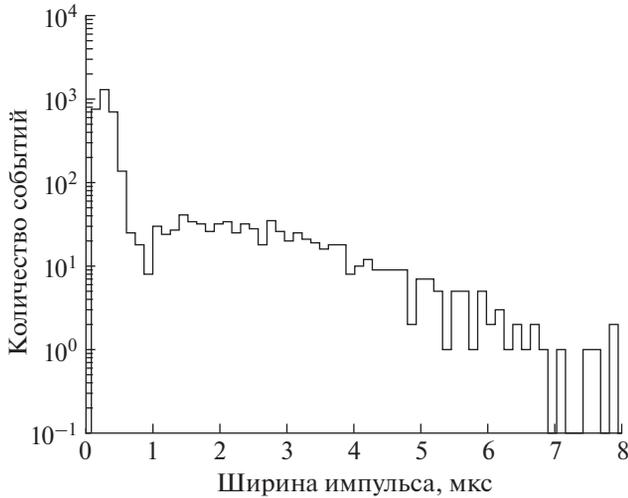


Рис. 3. Распределение сигналов (в логарифмическом масштабе) по ширине импульса.

влияния колебаний нулевой линии правая граница полного интервала ограничивается максимальным значением ширины импульса. Полный интеграл вычисляется на интервале $[t_{st}; t_{st} + \Delta t_{long}]$, а интеграл хвоста — на $[t_{st} + \Delta t_{short}; t_{st} + \Delta t_{long}]$, где t_{st} — время срабатывания триггера, Δt_{long} — максимальная ширина импульса, Δt_{short} — локальный минимум распределения ширины импульса.

На рис. 4 представлена точечная диаграмма, полученная с использованием метода интегрирования заряда с кривой разделения, которая имеет следующие параметры $C_x = 7.11$ мкс мВ, $C_y = 2.05$ мкс В, $K = 0.63$, $B = -2.45$ мкс·мВ. События, находящиеся выше кривой разделения, классифицируются как нейтроны.

Анализ градиента импульса

Анализ градиента импульса основан на различии в скорости затухания сигнала от нейтронов и легких заряженных частиц. Для реализации этого метода используется два параметра: амплитуда пика и амплитуда сигнала через определенный промежуток времени. Этот промежуток времени можно определить при помощи распределения ширины импульса на полувысоте по алгоритму, аналогичному определению Δt_{short} в методе интегрирования заряда.

На рис. 5 представлена точечная диаграмма, полученная методом анализа градиента импульса, на диаграмме наблюдаются две области, которые можно разделить кривой с параметрами $C_x = 16$ мВ, $C_y = 3.8$ мВ, $K = 0.55$, $B = 5$ мВ. Нейтронами считаются события, параметры которых лежат выше кривой разделения.

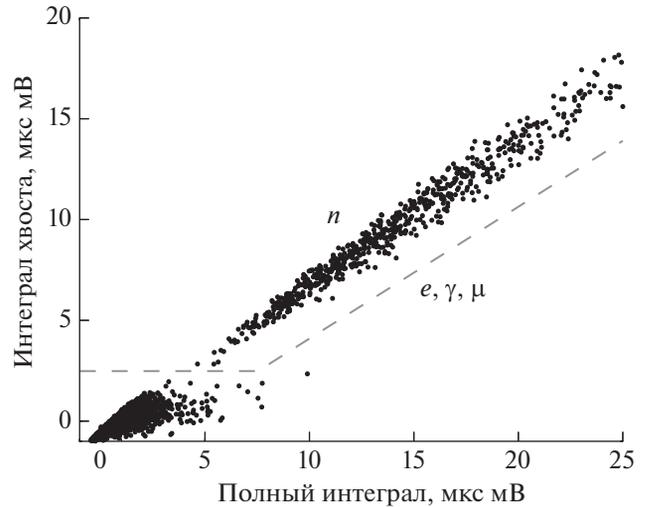


Рис. 4. Точечная диаграмма, полученная с помощью метода интегрирования заряда.

Упрощенный метод интегрирования заряда

Параметрами для упрощенного метода интегрирования заряда является амплитуда пика A_{max} и параметр D :

$$D = \ln \left(\sum_{n=a}^{n=b} a_n^2 \right), \quad (2)$$

где a_n — амплитуда сигнала в n -ой точке, a и b — нижний и верхний пределы интеграла хвоста.

На рис. 6 представлена точечная диаграмма, полученная с использованием упрощенного метода интегрирования заряда с кривой разделения, которая имеет следующие параметры $C_x = 12$ мВ,

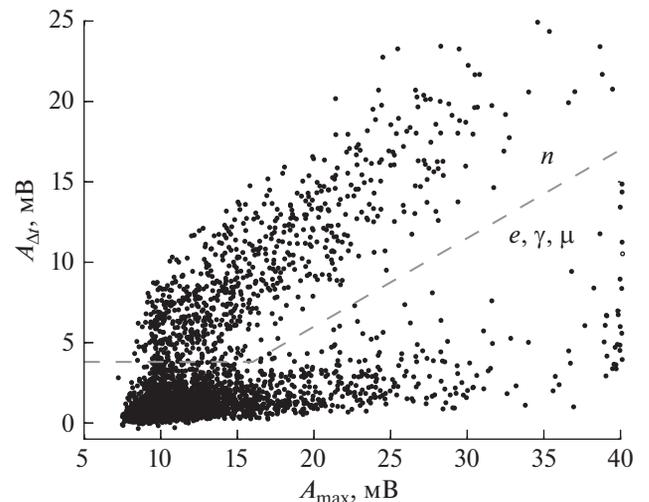
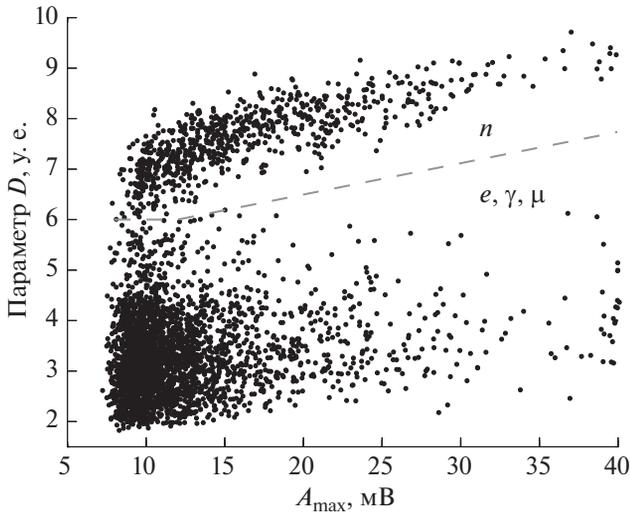


Рис. 5. Точечная диаграмма, полученная с помощью анализа градиента импульса.



$C_y = 6$ у.е., $K = 0.06$ у.е./мВ, $V = 5.26$ у.е. События, соответствующие большим значениям параметра D и находящиеся выше кривой разделения, классифицируются как нейтроны.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ

Эффективность методов разделения можно определить количеством ошибочно классифицированных событий. Ошибочная классификация, в свою очередь, связана с удаленностью и пересечением областей, соответствующих нейтронным и остальным событиям. Сравнение эффективности методов можно выполнить при помощи распределения расстояний между отображением зарегистрированного события до кривой разделения (рис. 7).

Это расстояние вычисляется как длина перпендикуляра, соединяющего точку с прямой. События с отрицательными значениями расстояния

Рис. 6. Точечная диаграмма, полученная с помощью упрощенного метода интегрирования заряда.

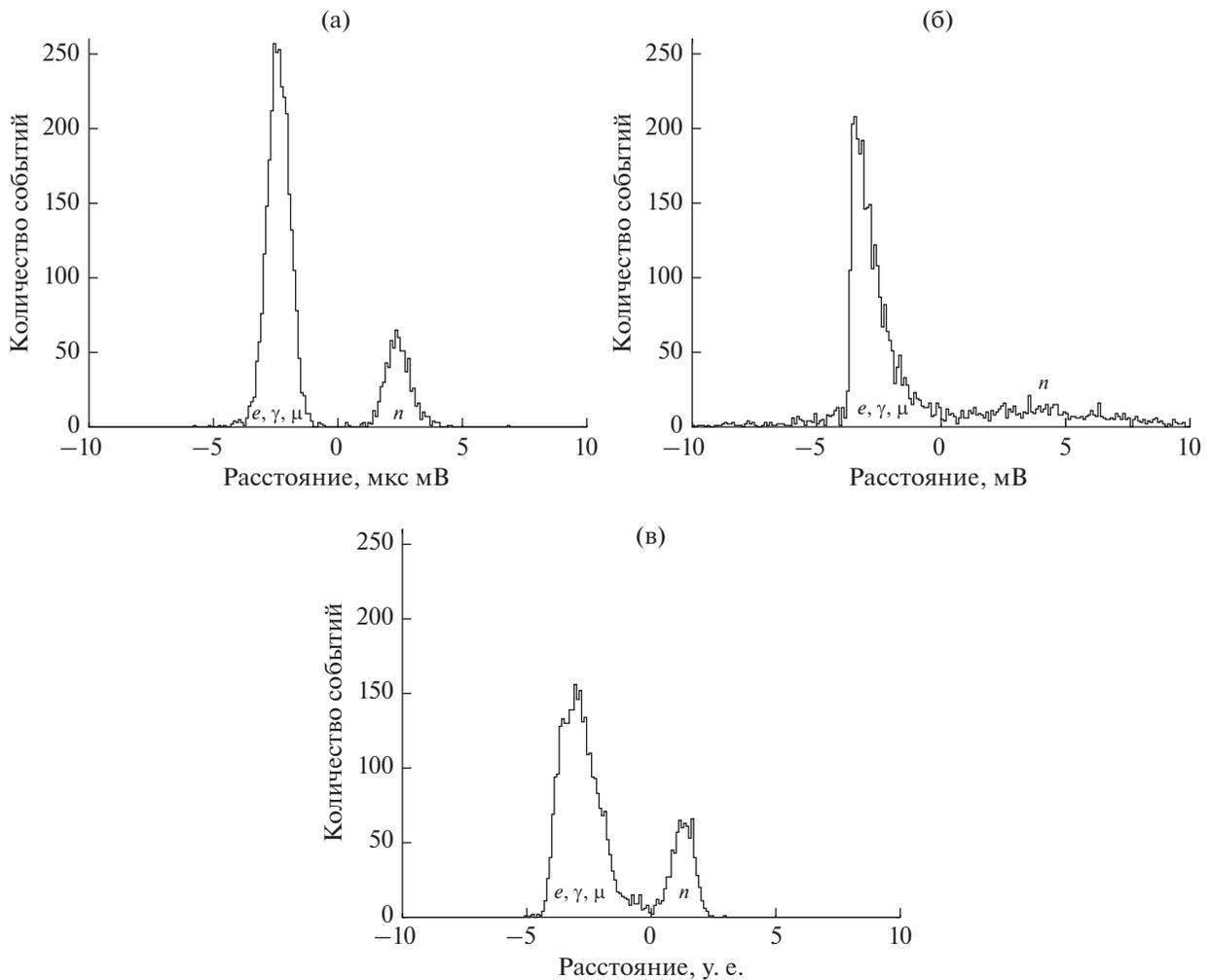


Рис. 7. Распределение зарегистрированных событий по расстояниям до кривой разделения: (а) метод интегрирования заряда; (б) анализ градиента импульса; (в) упрощенный метод интегрирования заряда.

Таблица 1. Сравнение методов

Название метода	ZnS(Ag)/B ₂ O ₃		ZnS(Ag)/ ⁶ LiF	
	<i>F</i>	<i>n</i> /мин	<i>F</i>	<i>n</i> /мин
Метод интегрирования заряда	6.55 ± 0.13	7.62	6.89 ± 0.07	5.45
Анализ градиента импульса	2.64 ± 0.03	8.28	1.03 ± 0.02	5.87
Упрощенный метод интегрирования заряда	4.66 ± 0.11	7.76	5.18 ± 0.12	5.58

Таблица 2. Ошибочная классификация нейтронов

Название метода	ZnS(Ag)/B ₂ O ₃	ZnS(Ag)/ ⁶ LiF
	<i>n</i> /мин	<i>n</i> /мин
Метод интегрирования заряда	0.01	0
Анализ градиента импульса	0.17	0.15
Упрощенный метод интегрирования заряда	0.08	0.03

(т.е. лежащие ниже кривой разделения), соответствуют сигналам от легких заряженных частиц или гамма-квантов, а с положительными – сигналам от нейтронов.

Для полученных распределений вычисляется показатель качества [1] *F*, который определяется по следующей формуле:

$$F = \frac{S}{\sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_{\gamma e}^2}}, \quad (3)$$

где *S* – расстояние между пиками, соответствующими нейтронным и шумовым событиям, а σ_n и $\sigma_{\gamma e}$ – их среднеквадратичный разброс.

Наиболее эффективным считается метод, имеющий максимальное значение показателя *F* (подробнее в [14–17]). Действительно, он возрастает с ростом расстояния *S* между пиками и уменьшением разброса значений расстояния. Меньшие значения *F* будут свидетельствовать о пересечении областей точечной диаграммы и, следовательно, о возможности ошибочной классификации событий.

В табл. 1 представлены значения *F*, а также скорости счета нейтронов (число нейтронов зарегистрированных за минуту), полученные при использовании описанных выше методов. В табл. 2 показаны скорости счета ошибочно классифицированных нейтронов при измерениях без использования сцинтиллятора. Наиболее качественное разделение обеспечивает метод интегрирования заряда. Анализ градиента импульса имеет наименьшее значение показателя качества и завышенную скорость счета нейтронов, что свидетельствует о большей доле событий, ошибочно классифицированных как нейтронные.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описана реализация методов отбора сигналов, вызванных захватом нейтронов, по их форме в неорганических сцинтилляторах на основе ZnS: интегрирования заряда, анализа градиента импульса и упрощенного интегрирования заряда. Проведено сравнение методов для сцинтилляционных композиций: ZnS(Ag)/B₂O₃ и ZnS(Ag)/⁶LiF. Для обоих сцинтилляторов лучшее качество разделения показывают метод интегрирования заряда и упрощенный метод интегрирования заряда. При использовании метода, основанного на анализе градиента импульса, имеется существенная вероятность некорректной классификации событий. В системах для регистрации нейтронов можно использовать совокупность перечисленных методов, что позволит минимизировать ошибочную классификацию событий.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект “Фундаментальные проблемы космических лучей и темная материя” № 0723-2020-0040.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Ranucci G.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 1995. V. 354. P. 389.
2. *Sabbah B. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 1968. V. 58. P. 102.
3. *Kuchnir F.T. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1968. V. 15. P. 107.
4. *Stenkin Yu.V.* // JETP Lett. 2017. V. 124. No. 5. P. 718.
5. *Pino F. et al.* // J. Instrum. 2015. V. 10. T08005.
6. *Gamage K.A.A. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2011. V. 642. P. 78.

7. *Flaska M. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2007. V. 577. P. 654.
8. *Polack J.K. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2015. V. 795. P. 253.
9. *Cester D. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2014. V. 748. P. 33.
10. *D'Mellow B. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2007. V. 578. P. 191.
11. *Shippen D.I. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2010. V. 57. P. 2617.
12. *Doucet E. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2020. V. 954. P. 161201.
13. *Knoll G.F.* Radiation Detection and Measurement (3rd ed.). 2000. New York: Wiley.
14. *Winyard R.A. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 1971. V. 95. P. 141.
15. *Sperr P. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 1974. V. 116. P. 55.
16. *Wolski D. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 1995. V. 360. P. 584.
17. *Cao Z. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 1998. V. 416. P. 32.

A Comparison of Neutron Identification Methods in Inorganic ZnS-Based Scintillators

P. S. Kuzmenkova^{1, *}, D. M. Gromushkin¹, T. D. Tretyakova¹, and I. A. Shulzhenko¹

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

**e-mail: PSKuzmenkova@mephi.ru*

Received March 3, 2021; revised May 11, 2021; accepted May 12, 2021

The paper presents a comparison of three methods for identifying neutrons in scintillators based on ZnS with ⁶Li and ¹⁰B: charge integration method, pulse gradient analysis and simplified digital charge collection. A quality factor is used for comparison. It is calculated by the distribution of distances from the event coordinate to the discrimination curve. It is shown that charge integration method is observed to provide the best discrimination performance in this research.

Keywords: inorganic scintillators, neutron identification, pulse shape discrimination