

Изучение свойств нейтронного детектора на основе $ZnS(Ag)+^6LiF$ для контроля радиационной обстановки вблизи ядерных объектов

Л. Бушама,* Д. М. Громушкин,† А. Н. Дмитриева‡
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
НОЦ «НЕВОД», Россия 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31
(Статья поступила 14.05.2018; Подписана в печать 05.07.2018)

Приводится описание нейтронного детектора на основе сцинтиллятора $ZnS(Ag)+^6LiF$, который может быть использован для контроля нейтронного фона вблизи ядерных объектов. Приводится подробное описание созданной модели детектора в программном пакете Geant4. В модели учтены реальные размеры детектора и его состав, описаны оптические свойства веществ, подключены необходимые процессы, промоделирован отклик детектора для мюонов и нейтронов. В случае моделирования отклика от нейтронов используются альфа-частица и тритий с энергиями, характерными для распада лития при захвате нейтрона. Данные моделирования показывают, что количество фотонов при захвате нейтрона примерно в девять раз больше, чем число фотонов при прохождении мюона, кроме того, отличается форма сигналов. в дальнейшем с помощью кода SERPENT планируется учесть все физические процессы распространения и взаимодействия нейтронов с веществом, а также учесть спектр нейтронов, возможный для внестатной ситуации на ядерной установке.

PACS: 29.40.Mc, 28.20.-v, 28.52.Nh УДК: 539.1.074.

Ключевые слова: тепловые нейтроны, сцинтиллятор $ZnS(Ag)+^6LiF$, нейтронный детектор, мониторинг нейтронов.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время растет число атомных электростанций, вводимых в эксплуатацию, поэтому мониторинг радиационной обстановки вокруг ядерных установок требует все большего и большего внимания для того, чтобы гарантировать безопасность используемых ядерных веществ и окружающей среды.

В Экспериментальном комплексе НЕВОД (НИЯУ МИФИ [1]) совместно с ИЯИ РАН был создан нейтронный детектор на основе сернистого цинка $ZnS(Ag)$ и фтористого лития, обогащенного до 90% изотопом 6Li . Данный детектор стал основой установок ПРИЗМА-32 и «Нейтрон» [2]. Установка ПРИЗМА-32 направлена на изучение нейтронов в ШАЛ, а установка «Нейтрон» — на контроль фоновых условий. Благодаря высокой эффективности, простоте эксплуатации и низкой стоимости созданный детектор подходит для мониторинга нейтронного фона вблизи ядерных объектов. С целью изучения характеристик и оптимизации параметров данного детектора для решения задач по контролю радиационной обстановки вблизи ядерных объектов была создана его математическая модель. Модель, в которой учтены реальные размеры детектора, состав и оптические свойства, создана в программном пакете Geant4 [3].

*E-mail: Lazhar-phy@hotmail.fr

†E-mail: DMGromushkin@mephi.ru

‡E-mail: ANDmitriyeva@mephi.ru

1. ОПИСАНИЕ НЕЙТРОННОГО ДЕТЕКТОРА

Основой установки ПРИЗМА-32 являются нейтронные детекторы. Конструкция детектора является стандартной для сцинтилляционных детекторов с той лишь разницей, что в нем используется специализированный тонкий сцинтиллятор. В основании светонепроницаемого корпуса (полиэтиленовая бочка объемом 200 л, высотой 570 мм, диаметром 740 мм) расположен неорганический сцинтиллятор $ZnS(Ag)+^6LiF$ в виде тонкого слоя ~ 30 мг/см² (рис. 1, а) — это эффективный сцинтиллятор для регистрации тепловых и надтепловых нейтронов. Данный детектор при захвате нейтрона в реакции $^6Li(n, \alpha)t + 4.8$ МэВ производит 160 000 фотонов. Это позволяет собрать более 50 фотоэлектронов с фотокатода ФЭУ от n -захвата. Сцинтиллятор просматривается одним фотоэлектронным умножителем (ФЭУ-200) [4] с диаметром фотокатода 15 см. Для улучшения светосбора используется светоотражающий конус из фольгированного вспененного полиэтилена толщиной 5 мм (рис. 1, б).

2. ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ GEANT4

Для создания модели нейтронного детектора использовался программный пакет Geant4 (GEometry ANd Tracking) [3, 5] который представляет инструмент для моделирования процесса прохождения частиц через вещество с использованием методов Монте-Карло. Программный пакет разработан в CERN, последняя версия написана на объектно-ориентированном языке программирования C++. Области применения включают в себя физику высоких энергий и исследование ядерных реакций, медицину, ускорители частиц, космиче-

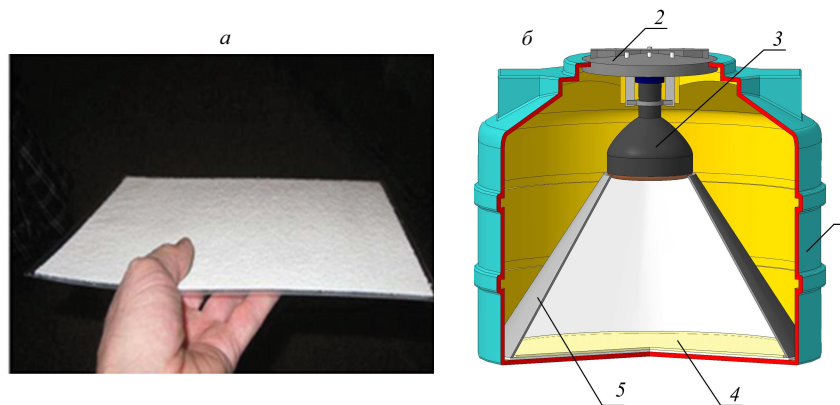


Рис. 1: *а* — Фото сцинтиллятора $\text{ZnS(Ag)}+{}^6\text{LiF}$. *б* — Конструкция нейтронного детектора: 1 – корпус для экранирования света, 2 – крышка, 3 – фотоумножитель ФЭУ-200, 4 – сцинтиллятор $\text{ZnS(Ag)}+{}^6\text{LiF}$, 5 – светоотражающий конус.

ские физические исследования.

В Geant4 можно контролировать и задавать следующие параметры для моделирования соответствующих процессов:

- геометрию системы;
- материалы, которые используются в эксперименте;
- фундаментальные физические частицы;
- генерацию первичных событий;
- прохождение трека частиц через различные материалы и электромагнитные поля;
- описание физики процессов, определяющих взаимодействие частиц;
- отклик чувствительных элементов детектирующей системы;
- генерацию и хранение данных о событии (треки, вершины, частицы);
- визуализацию детектора и траекторий частиц;
- и т.д.

3. ПРОЦЕСС СОЗДАНИЯ МОДЕЛИ В GEANT4

Создание модели детектора в Geant4 состояло из нескольких этапов: задание состава и геометрии, описание оптических свойств, описание генератора частиц.

3.1. Задание состава и геометрии

Для описания всех материалов, входящих в состав детектора, использовались два способа: вызов элементов и компонентов из NIST (National Institute of

Standards and Technology database) — собственной библиотеки Geant4; непосредственное создание, когда дело касается новой компоненты. Используемыми классами являются *G4Isotope*, *G4Element*, *G4Material*.

Пакет Geant4 дает возможность задать большое число вариантов форм объемов (простые формы, специальные формы, булевы формы).

Все объемы детектора были созданы с учетом их реальных размеров и составляющих материалов. Любой объем описывается в три этапа:

- форма объема (*G4VSolid*);
- логический объем (*G4LogicalVolume*);
- физический объем (*G4VPhysicalVolume*).

Во время построения объема детектора необходимо соблюдать определенные правила. Например, есть иерархия, которая обозначает, что объемы не могут пересекать друг друга.

Визуализация созданной геометрической модели детектора тепловых нейтронов установки ПРИЗМА-32 в программном пакете Geant4 представлена на рис. 2.

3.2. Описание оптических свойств

Оптические свойства объявляются в два этапа. На первом этапе создается класс, в котором определяются все частицы (первичные и вторичные частицы) и для каждой частицы добавляются соответствующие процессы (фотоэффект, комптоновское рассеяние, тормозное излучение, ионизация среды и т.д.). Во втором этапе прописываются оптические свойства всех материалов.

Диапазон энергий фотонов соответствует области чувствительности ФЭУ-200: от 1.5 эВ до 3.85 эВ (рис. 3). Для воздуха и полиэтилена заданы коэффициенты преломления: 1.0 и 1.5. Для стекла ФЭУ задан коэффициент преломления 1.5.

Для сцинтиллятора заданы следующие параметры:

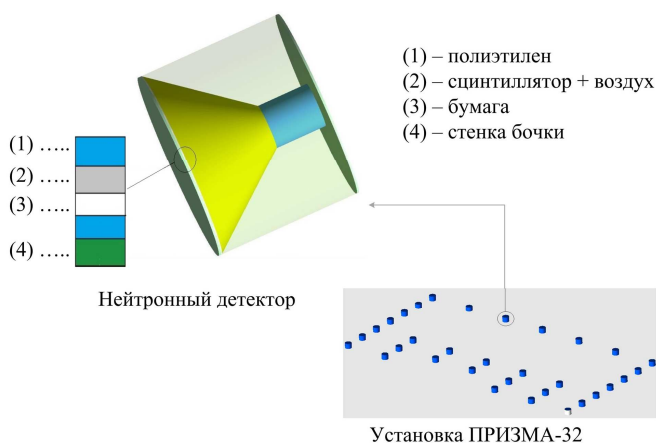


Рис. 2: Визуализация геометрической модели детектора тепловых нейтронов установки ПРИЗМА-32 в программном пакете Geant4.

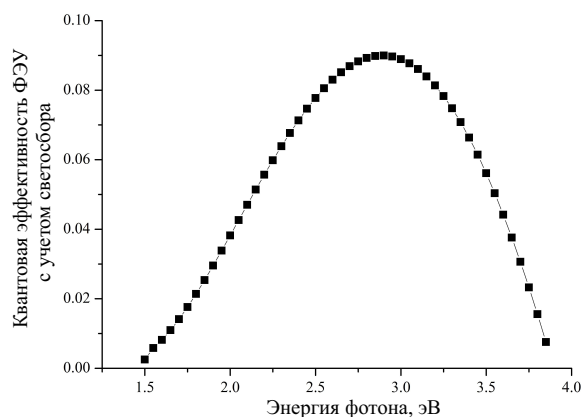


Рис. 3: Спектр чувствительности ФЭУ-200

- спектр излучения сцинтиллятора $ZnS(Ag)+^6LiF$ (рис. 4);
- коэффициент преломления 2.36;
- длина поглощения 5 мм;
- световыход 75000 фотонов/МэВ;
- время высвечивания 200 нс.

На рис. 5 показан процесс сцинтилляции при прохождении мюона через детектор. Оптические поверхности детектора прописаны в модели следующим образом:

- между бумагой и сцинтиллятором, бумагой и полиэтиленом, светособирающим конусом и воздухом задано диффузное отражение (рис. 5, б);
- между стеклом и фотокатодом ФЭУ задано зеркальное отражение.

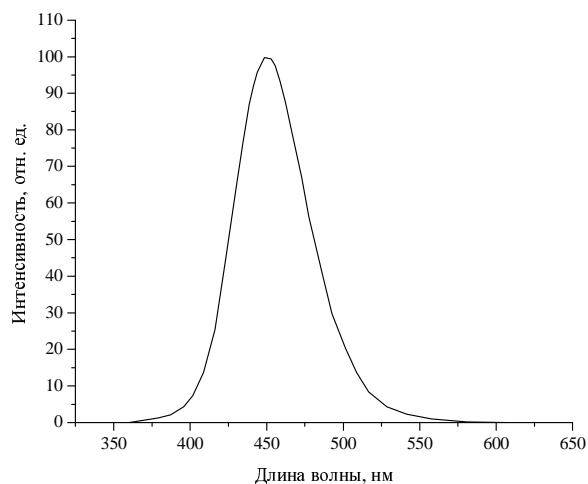


Рис. 4: Спектр излучения $ZnS(Ag)+^6LiF$

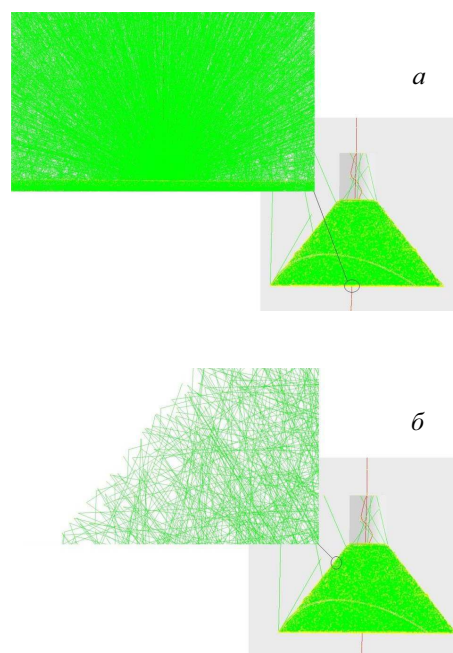


Рис. 5: а — процесс сцинтилляции при прохождении заряженной частицы (μ^+) через детектор, б — диффузное отражение

3.3. Описание генератора частиц

В этом классе запускаются все необходимые частицы с помощью *GAParticleGun*. Моделируемыми частицами в работе являются мюоны и нейтроны, а также частицы (альфа-частицы и тритий), образовавшиеся при распаде лития.

4. ПРОЦЕСС МОДЕЛИРОВАНИЯ

4.1. Моделирование отклика детектора

В первой части моделирования отклика детектора были запущены 500 мюонов (фоновые частицы) прямо в детектор с разными энергиями и координатами. Чтобы получить спектр мюонов, близкий к реальному, были сделаны следующие действия:

- разыграны энергии по закону $\sim E^{-2.7}$ в интервале [100 МэВ, $+\infty$];
- разыграны координаты мюонов равномерно по сцинтиллятору;
- разыграны зенитные ($\sim \cos^{3.2} \theta \sin \theta d\theta d\varphi$) и азимутальные (равномерно от 0 до 2π) углы для того, чтобы частицы попадали в сцинтиллятор с разными направлениями прилета.

Во второй части моделирования проведен расчёт отклика детектора при захвате нейтронов. Все физические процессы распространения и взаимодействия нейтронов с веществом планируется учесть в дальнейшем с помощью кода SERPENT [6]. Будет рассматриваться спектр нейтронов, возникновение которого возможно во время внештатной ситуации на ядерной установке. На данном этапе вместо нейтронов были заданы альфа-частица и тритий, которые образуются вследствие взаимодействия нейтронов с ядрами лития:



Энергии запускаемых частиц указаны в скобках. Точки запуска этих частиц моделировались внутри сцинтиллятора. Частицы вылетали с противоположными направлениями. Количество запускаемых пар частиц — альфа-частиц и трития — равнялось числу мюонов.

4.2. Моделирование интегрирования аналогового сигнала с ФЭУ

Моделирование полученных сигналов ФЭУ проводилось следующим образом:

- моделирование времени срабатывания фотоумножителя T складывалось из времени прихода фотонов на катод $T_{\text{РН}}$ и собственного времени срабатывания ФЭУ $T_{\text{РМТ}}$ ($T = T_{\text{РН}} + T_{\text{РМТ}}$); собственное время срабатывания ФЭУ $T_{\text{РМТ}}$ было промоделировано с учетом джиттера ФЭУ-200;
- моделирование заряда от фотоэлектрона. Расчёт сигнала от одного фотоэлектрона проводился по формуле:

$$At = A + \sigma \sqrt{2 \ln \frac{1}{\gamma_1}} \cdot \cos(2\pi\gamma_2),$$

$$A = -4 \ln(\gamma_0),$$

где γ_0 , γ_1 и γ_2 — три базовых случайных величины, A — одноэлектронный отклик ФЭУ, $\sigma = 2.8$ ф.э.

- суммирование сигналов от отдельных фотоэлектронов для разных времен интегрирования.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 6 представлены гистограммы усреднённых по числу событий распределений времен прихода фотонов на фотокатод ФЭУ T при прохождении через детектор мюонов и при захвате нейтронов (распады лития).

В результате моделирования регистрации мюонов и нейтронов видно, что число фотонов от регистрации нейтронов примерно в девять раз больше, чем число фотонов от мюонов.

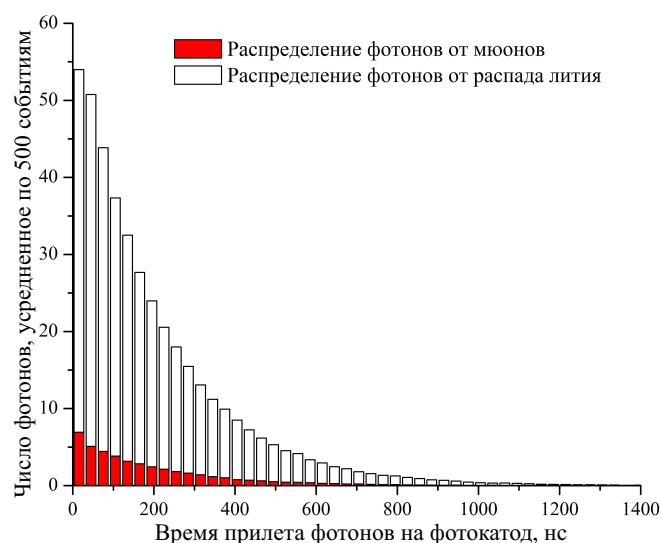


Рис. 6: Распределения фотонов от мюонов и распада лития

На рис. 7, а проведен пример промоделированных распределений амплитуд сигналов от отдельных фотоэлектронов относительно времени прихода сигнала от ФЭУ. На рис. 7, б приведен результат интегрирования этих сигналов для двух времен интегрирования: 1 мкс и 5 мкс.

На рисунках 8 и 9 представлены примеры осциллограмм сигналов с детектора нейтронов от зарегистрированного нейтрона и заряженной частицы. По оси абсцисс — время (цена деления — 2 мкс и 4 мкс для рис. 8 и 9, соответственно). По оси ординат — амплитуда сигнала. Желтым цветом показан исходный сигнал с ФЭУ (цена вертикального деления 1 мВ), голубому цвету соответствует интегрирование усиленного сигнала с одной микросекундой, фиолетовому — с двадцатью микросекундами (цена вертикального деления для обоих составляет 20 мВ).

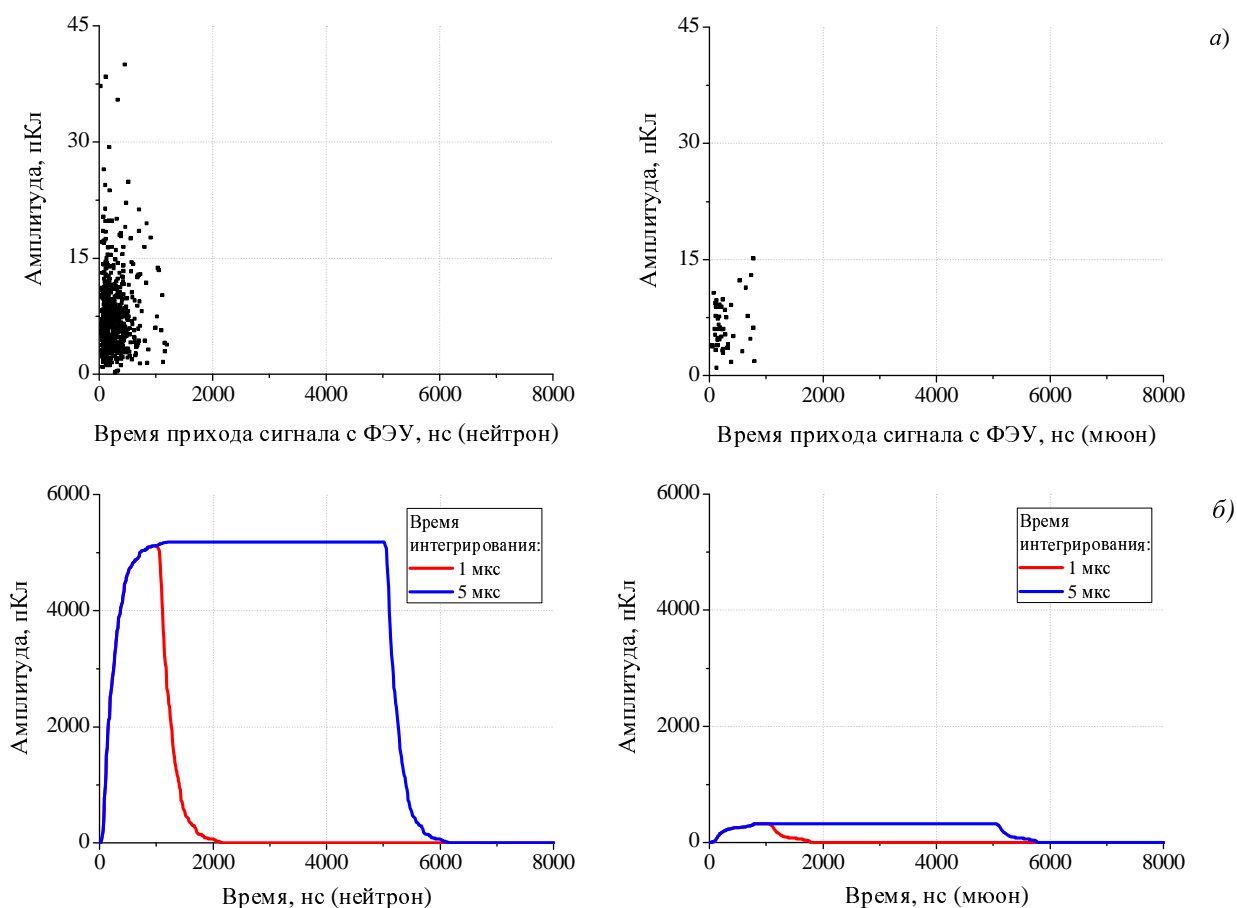


Рис. 7: Пример промоделированных распределений амплитуд сигналов от отдельных фотоэлектронов относительно времени прихода сигнала от ФЭУ (вверху) и интегрирования сигналов при регистрации нейтрона и мюона с одной микросекундой и пятью микросекундами (внизу)

Сравнение формы сигнала дает хорошее совпадение результатов моделирования и эксперимента для времени интегрирования сигналов 1 мкс. Отличие для большего времени интегрирования вызвано наличием долгоживущей компоненты в спектре сцинтиллятора ZnS(Ag): тяжелые частицы (альфа-частицы и тритий) возбуждают и быструю и медленную компоненты, но электроны и мюоны возбуждают в основном только быструю, которая в дальнейшем также будет учтена в модели.

Результаты моделирования отклика данного детектора доказывают его способность разделять сигналы от нейтронов и фоновых заряженных частиц (мюонов и электронов).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана модель нейтронного детектора на основе сернистого цинка ZnS(Ag) и фтористого лития, обога-

щенного до 90% изотопом ^6Li , с использованием программного пакета Geant4. Проведено моделирование его отклика для двух типов частиц – нейтронов и мюонов. Показана эффективность данного детектора для разделения сигналов от нейтронов и фоновых частиц.

В дальнейшем планируется промоделировать отклик детектора на аварийные выбросы с учетом фоновых условий. Распространение нейтронов в случае аварии будет вычисляться с помощью кода SERPENT [6]. Фоновый уровень частиц космических лучей будет оцениваться с помощью кода CORSIKA [7].

Благодарности

Работа выполнена на УНУ НЕВОД при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект RFMEFI59114X0002; ПКС НИЯУ МИФИ, проект 02.a03.21.0005).

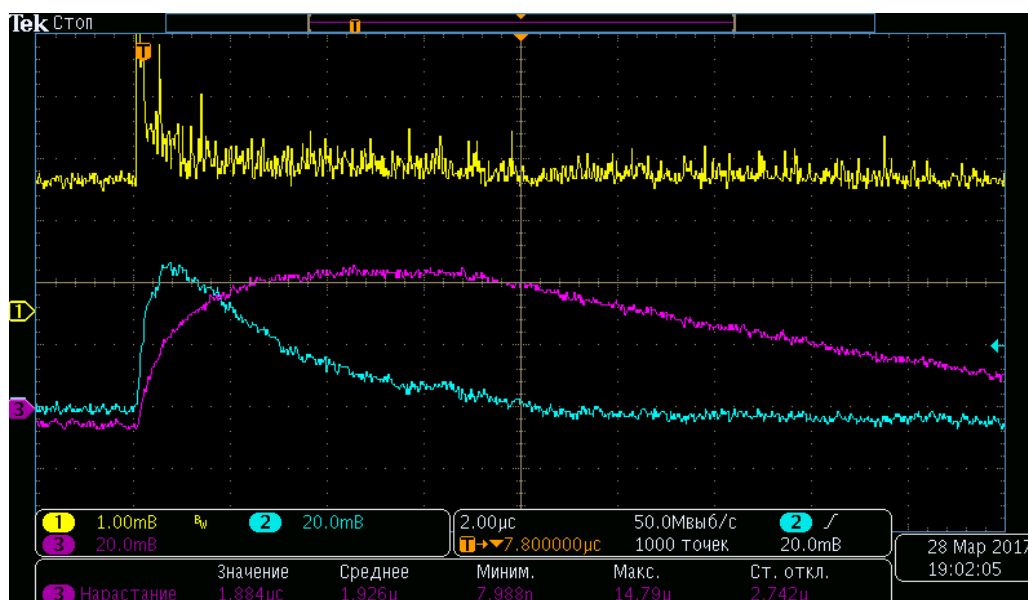


Рис. 8: Сигнал от нейтрона (экспериментальные данные)

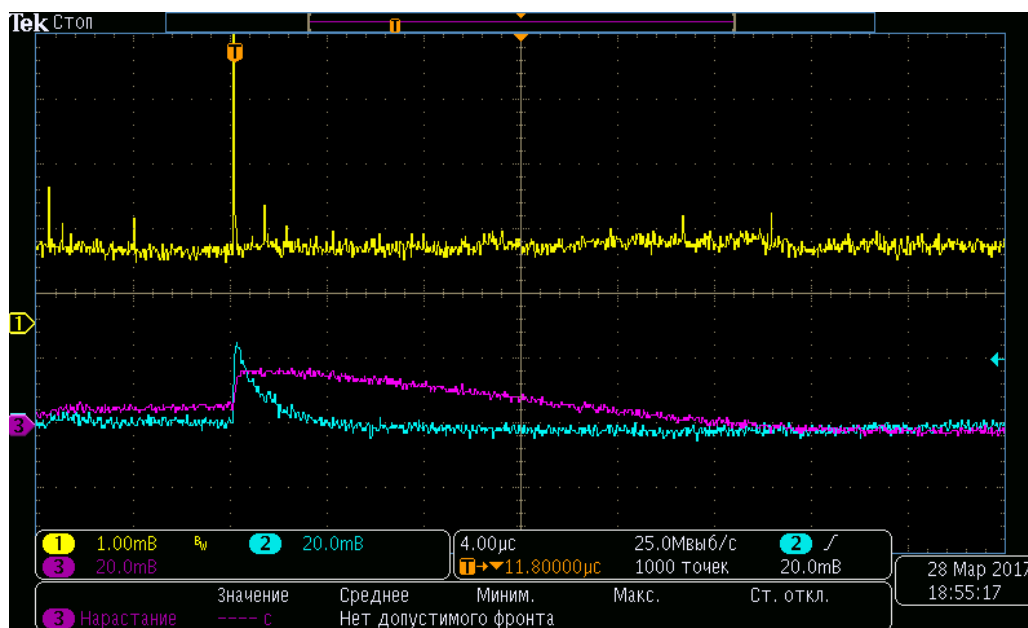


Рис. 9: Сигнал от заряженной частицы (экспериментальные данные)

- [1] Официальный сайт ЭК НЕВОД: <http://nevod.mephi.ru/>
 [2] Gromushkin D.M., Sten'kin Yu. V., Khatsukov I.B. Bulletin of the Lebedev Physics Institute. Russia. 2010. **37**. P. 344.
 [3] Официальный сайт программного пакета Geant4: <http://geant4.cern.ch/>
 [4] <http://ekran-os.ru/ru/feu-200>
 [5] Allison J., Amako K., Apostolakis J., Arce P., Asai M., Aso T., Bagli E., Bagulya A., Banerjee S., Barrand G. et

- al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2016. **A835**. P. 186.
 [6] <http://montecarlo.vtt.fi/>
 [7] Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N., Schatz G., Thouw T. CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers. Report FZKA 6019 Forschungszentrum Karlsruhe, 1998.

Study of the properties of neutron detector based on $\text{ZnS}(\text{Ag})+{}^6\text{LiF}$ for monitoring of radiation situation near nuclear setups

L. Bouchama^a, A. N. Dmitrieva^b, D. M. Gromushkin^c

Experimental Complex NEVOD, National Research Nuclear University MEPHI, Moscow 115409, Russia.

E-mail: ^aLazhar-phy@hotmail.fr, ^bANDmitriyeva@mephi.ru, ^cDMGromushkin@mephi.ru

The neutron detector on the basis of $\text{ZnS}(\text{Ag})+{}^6\text{LiF}$ scintillator which can be used for the monitoring of the level of background radioactivity near nuclear objects is described. The detailed description of the created model of the detector in the software package Geant4 is given. The model takes into account the real dimensions of the detector and its composition. Optical properties of substances are described. The necessary processes are inserted. Response of the detector for muons and neutrons was simulated. In the case of neutrons, response simulation used alpha and tritium particles with energies corresponding to the lithium decay after neutron capture. The processing of the results shows that the average number of photons counted in the result of neutron capture is about nine times more than the number of photons emitted after passing of muons through the scintillator, in addition, the shape of the signals differs. Further, using the SERPENT code, it is planned to take into account all physical processes of propagation and interaction of neutrons with matter, as well as to take into account the neutron spectrum possible for a non-emergency situation at the nuclear setup.

PACS: 29.40.Mc, 28.20.-v, 28.52.Nh.

Keywords: thermal neutrons, $\text{ZnS}(\text{Ag})+{}^6\text{LiF}$ scintillator, neutron detector, neutron monitoring.

Received 5 July 2018.

Сведения об авторах

1. Бушама Лазхар – аспирант; e-mail: lazhar-phy@hotmail.fr.
 2. Громушкин Дмитрий Михайлович – канд. физ.-мат. наук, ассистент, тел. +7(495) 788-56-99, доб. 9613, e-mail: dmngromushkin@mephi.ru.
 3. Дмитриева Анна Николаевна – канд. физ.-мат. наук, доцент, тел. +7-(495) 788-56-99, доб. 9927, e-mail: andmitriyeva@mephi.ru.
-