

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРОННОГО ДЕТЕКТОРА НА ВЫВЕДЕННОМ ПУЧКЕ НУКЛОТРОНА

*С. В. Афанасьев<sup>а</sup>, А. А. Балдин<sup>а</sup>, В. А. Басков<sup>б</sup>, Д. К. Дряблов<sup>а, 1</sup>,  
Б. В. Дубинчик<sup>а</sup>, З. А. Игамкулов<sup>а</sup>, В. А. Дронов<sup>б</sup>, А. И. Львов<sup>б</sup>,  
В. В. Полянский<sup>б</sup>, Л. Н. Павлюченко<sup>б</sup>, С. С. Сидорин<sup>б</sup>, К. Михаличкова<sup>в</sup>*

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>б</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

<sup>в</sup> Университет П. Й. Шафарика, Кошице, Словакия

Проведено исследование характеристик нейтронного детектора на установке МАРУСЯ в районе фокуса F4 с использованием выведенного пучка дейтронов в 44–46-м сеансах ускорителя нуклотрон ЛФВЭ ОИЯИ. Показано, что эффективность регистрации нейтронов составляет около 27%. По временным характеристикам детектор может быть использован в экспериментальной установке SCAN-3 для регистрации нуклонов из распада  $\eta$ -ядра по  $\pi n$ - и  $pn$ -каналам.

The characteristics of the neutron detector were investigated at the MARUSYA setup using a deuteron beam of the Nuclotron accelerator (VBLHEP, JINR). It is shown that the efficiency of neutron detection can reach 27%. This detector can be used in the experimental setup SCAN-3 for recording of nucleons from  $\eta$ -nucleus decays in the  $\pi n$  and  $pn$  channels.

PACS: 29.40.Mc; 28.20.-v

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач трехплечевой экспериментальной установки SCAN-3 [1] является регистрация нейтронов от распада  $\eta$ -мезонного ядра по  $\pi n$ - и  $pn$ -каналам. Теоретические предсказания, представленные в работах [2, 3], и результаты экспериментов [4, 5] накладывают требования на точность в определении энергии  $\pi n$ - и  $pn$ -пар  $\delta E \leq 10$  МэВ. Единственный способ обеспечить спектрометрию нейтронов — использование времяпролетного метода. В условиях геометрии установки SCAN-3 это приводит к ограничению на точность измерения времени пролета нейтронов  $\delta t = 2,2$  нс для  $\pi n$ -канала и  $\delta t = 0,4$  нс для  $pn$ -канала в области кинетической энергии нейтрона от 100 до 300 МэВ.

Проведение испытания такого типа детекторов в области высоких энергий является нетривиальной задачей. Для проведения тестирования созданного нейтронного детектора установки SCAN-3 был сформирован нейтронный пучок с помощью реакции стриппинга дейтронов на фиксированной мишени. Регистрация протонов от развала дейтронов позволила реализовать метод мечения нейтронов.

---

<sup>1</sup>E-mail: dryablov@lhe.jinr.ru

### 1. НЕЙТРОННЫЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ SCAN-3

Прототип нейтронного детектора состоял из 10 отдельных счетчиков (рис. 1). Восемь счетчиков (8ND) представляли собой сцинтилляторы размерами  $50 \times 14 \times 5$  см, каждый из которых просматривается двумя фотоэлектронными умножителями ФЭУ-143, установленными на оптической смазке с двух противоположных торцов счетчика. Счетчики 8ND располагались по пучку попарно и образовывали четыре слоя сцинтилляторов.

Счетчики A1 и A2 представляли собой две сцинтилляционные пластины размерами  $50 \times 30 \times 2$  см, просматриваемые с одного из торцов ФЭУ-143 на оптической смазке. A1 и A2 использовались в качестве защиты от заряженных частиц и были включены в общую схему триггера установки в качестве счетчиков антисовпадений. Каждый ФЭУ, используемый в прототипе нейтронного детектора, имел на цоколе блок высоковольтного питания, собранного по схеме преобразователя напряжения. Все блоки питаются внешним источником напряжения  $+24$  В и  $-24$  В.

В измерениях в качестве мишени использовался пластик толщиной 5 см.

Предварительно перед измерениями на пучке дейтронов были сняты счетные характеристики на космических частицах для всех счетчиков нейтронного детектора, счетчиков A1 и A2. На рис. 2 показана счетная характеристика ФЭУ-143 одного из счетчиков при пороге формирования блока формирователя 11 мВ. Каждое измерение дли-

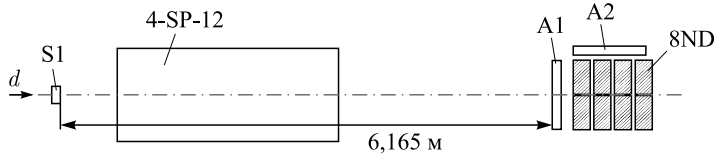


Рис. 1. Схема расположения прототипа нейтронного детектора (8ND) во время проведения исследований его характеристик на прямом пучке дейтронов ( $d$ ) в районе фокуса F4 установки МАРУСЯ: S1 — мишень; 4-SP-12 — электромагнит; A1, A2 — счетчики антисовпадений; 8ND — прототип нейтронного детектора. Вид сбоку

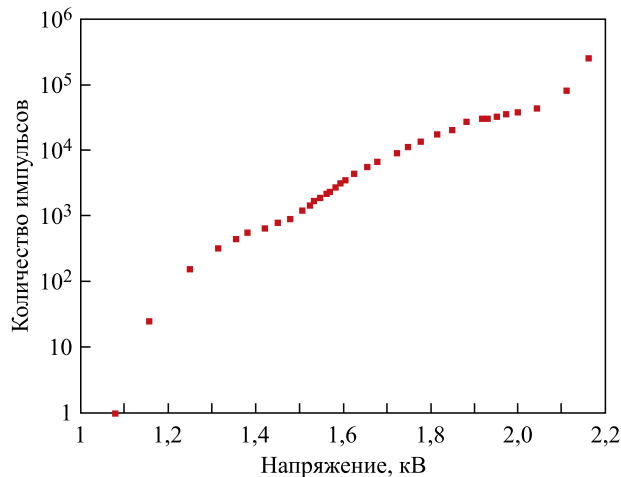


Рис. 2. Счетная характеристика ФЭУ-143 для одного из счетчиков нейтронного детектора

лось 50 с. На графике счетной характеристики заметны две ступени. Нижняя ступень на уровне 700 отсчетов соответствует среднему потоку заряженных космических частиц  $\approx 2 \text{ дм}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . То есть с учетом апертуры  $50 \text{ см} \times 14 \text{ см} = 700 \text{ см}^2$  ( $7 \text{ дм}^2$ ) и времени измерения 50 с количество срабатываний от заряженных частиц составило  $2 \times 7 \times 50 = 700$ . Верхняя ступень, начиная со счета более 1000 импульсов/с, является счетом одноэлектронных «темновых» импульсов при напряжении питания, соответствующем световой анодной чувствительности 300 А/Лм.

Дополнительно проведены измерения с использованием сигналов от светодиодов, расположенных на гранях нейтронного детектора (рис. 3) и счетчиков антисовпадений (рис. 4). Данные измерения дали предварительную информацию о временном разрешении каждого ФЭУ и временной задержке в каждом канале электроники. На рис. 4 показан временной спектр счетчика А1 в каналах времяцифрового преобразователя (ВЦП). Стартовый сигнал для ВЦП запускался одновременно с включением светодиода, сигнал с ФЭУ А1 являлся стоп-сигналом. Цена одного канала ВЦП составляла 24 пс, ширина на половине высоты полученного от светодиода временного пика составила  $< 250 \text{ пс}$ .

Испытания прототипа нейтронного детектора были проведены на пучке дейтронов во время 44–46-го сеансов ускорителя нуклотрон. В качестве места испытания была выбрана установка МАРУСЯ [6], расположенная в фокусе F4 канала транспортировки выведенного пучка нуклотрона. Схема расположения детектора в районе фокуса F4 приводится на рис. 1 (вид сбоку). Во время сеансов работы ускорителя для исследования характеристик нейтронного детектора использовался выведенный дейтронный пучок с энергиями 1 и 3 ГэВ/нейтрон, средней интенсивностью  $I = 10^8 \text{ с}^{-1}$ .

Для получения нейтронов с энергиями 1 и 3 ГэВ/нейтрон было предложено использовать реакцию развала дейтрона на протон и нейтрон в веществе мишени S1. При проведении эксперимента в фоновом режиме тонкую мишень S1 установили в периферии пучка с оценочным количеством падающих на мишень частиц  $< 10^6 \text{ с}^{-1}$ . После развала дейтрона нейтрон летит непосредственно в сторону исследуемого детектора, а протон отклоняется магнитом и регистрируется счетчиком А3, входящим в общий триггер. Дейтроны пучка, которые не провзаимодействовали с мишенью, транспортируются дальше по каналу ВП-1 к другим потребителям пучка нуклотрона. Регистрация протона в А3 с необходимым импульсом может служить одним из условий для выделения нейтрона от

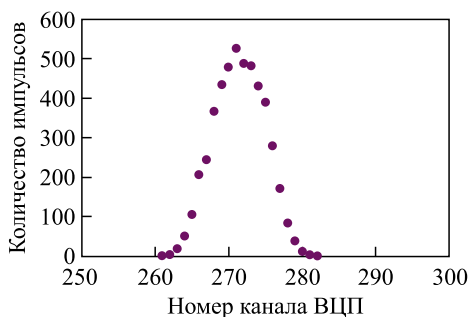


Рис. 3. Временной спектр одного из счетчиков нейтронного детектора 8ND при использовании сигнала от светодиода

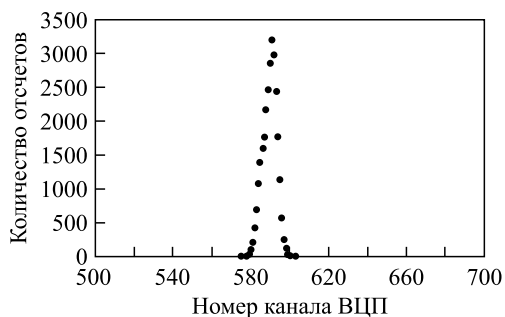


Рис. 4. Временной спектр счетчика антисовпадений А1 при использовании сигнала от светодиода

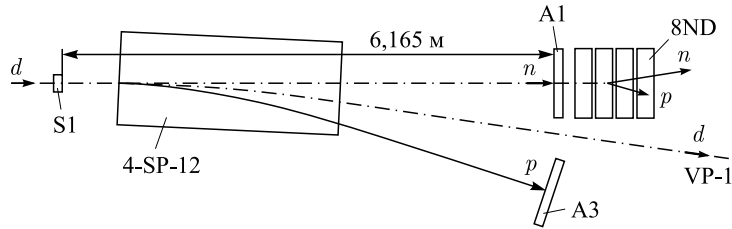


Рис. 5. Схема эксперимента с включенным электромагнитом 4-SP-12. Вид сверху

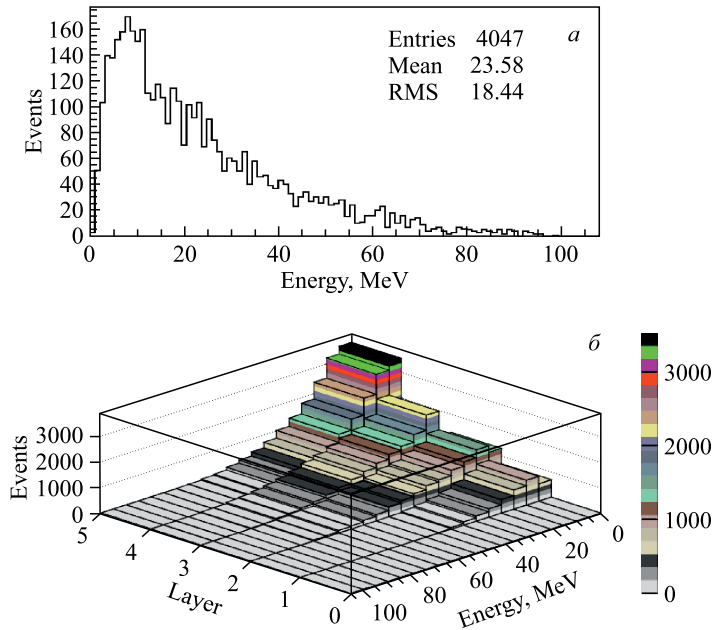


Рис. 6. Энергетическое распределение сигналов от взаимодействий нейтронов в одном слое детектора (а) и число событий в каждом слое (б). Измерение проводилось при включении счетчиков А1 и А2 на антисовпадение

развала дейтрона. Так же по временной разнице сигналов от счетчиков А3 и 8ND можно определить слой, в котором произошла регистрация нейтрона.

Идея эксперимента (рис.5) заключается в том, что нейтрон, пролетая через слой нейтронного детектора, в какой-то момент сталкивается с протоном пластика и выбивает его. Как только заряженная частица начнет перемещаться в толще пластика, срабатывает счетчик. По длине пролетной базы и по времени прихода сигнала от взаимодействия можно оценить скорость и энергию нейтрона.

На рис. 6 приведено энергетическое распределение энерговыделения нейтронов в одном слое и число срабатываний детектора в зависимости от слоя. Видно, что число сигналов с детектора растет от слоя к слою, так как увеличивается вероятность взаимодействия нейтронов с веществом детектора, и вторичные заряженные частицы — в основном протоны от  $np$ -столкновений — имеют преимущественное направление импульса вперед. При условии попадания в исследуемый детектор заряженных частиц почти

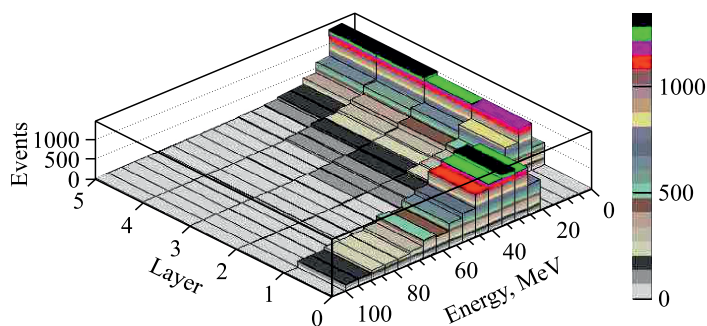


Рис. 7. Число событий в каждом слое нейтронного детектора для случая попадания заряженных частиц в детектор

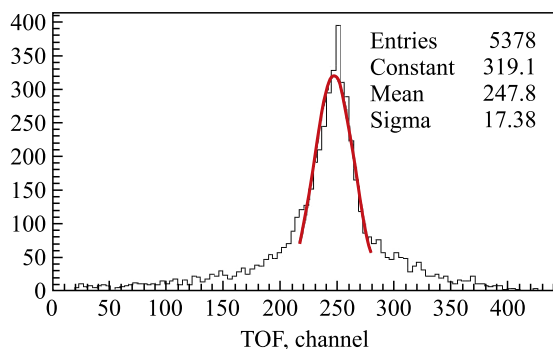


Рис. 8. Время пролета нейтрона, образовавшегося от развала дейтрона с энергией 1 ГэВ/нуклон, на базе «стартовый счетчик S1 — нейтронный детектор (счетчик N<sub>6</sub>, слой 3)». Цена деления канала ВЦП — 0,1 нс

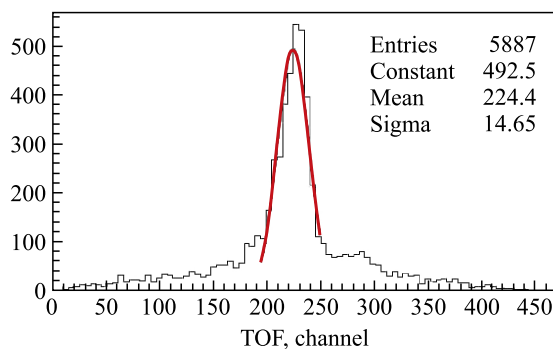


Рис. 9. Время пролета нейтрона, образовавшегося от развала дейтрона с энергией 3 ГэВ/нуклон, на базе «стартовый счетчик S1 — нейтронный счетчик N<sub>6</sub>». Цена деления канала TOF — 0,1 нс

вся энергия выделяется в первом слое. На рис. 7 показано число срабатываний детектора в зависимости от слоя при попадании в детектор заряженных частиц.

На рис. 8 и 9 для двух значений энергии дейтронного пучка показано время пролета нейтрона между стартовым счетчиком S1 и одним из счетчиков одного из слоев нейтронного детектора в каналах ВЦП (цена деления канала ВЦП 0,1 нс).

В табл. 1, 2 приведены значения временных сигналов со всех восьми счетчиков нейтронного детектора при энергиях пучка дейтронов 1 и 3 ГэВ/нейтрон.

Так как получаемый пучок нейтронов не является моноэнергетическим, для более корректного определения временной погрешности каждого счетчика нейтронного детектора были исследованы распределения времени пролета между двумя соседними счетчиками. В табл. 3 представлены соответствующие временные характеристики и дана оценка временной погрешности каждого счетчика.

Таблица 1. Временные характеристики сигналов каждого счетчика нейтронного детектора при энергии *d*-пучка 3 ГэВ/нейтрон

Значение временного сигнала	$N_i$							
	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$N_5$	$N_6$	$N_7$	$N_8$
Среднее, нс	21,30	20,07	21,93	21,86	20,44	22,48	21,13	21,22
$\sigma$ , нс	1,54	1,75	1,47	1,53	1,61	1,46	1,45	1,49

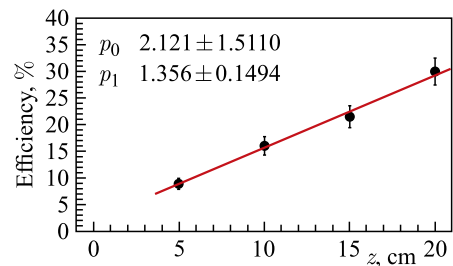
Таблица 2. Временные характеристики сигналов каждого счетчика нейтронного детектора при энергии *d*-пучка 1 ГэВ/нейтрон

Значение временного сигнала	$N_i$							
	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$N_5$	$N_6$	$N_7$	$N_8$
Среднее, нс	23,55	22,41	24,34	24,11	—	24,74	23,77	24,04
$\sigma$ , нс	1,83	2,12	1,93	1,79	—	1,74	1,71	1,76

Таблица 3. Разница времени пролета для двух счетчиков в смежных слоях нейтронного детектора при энергии *d*-пучка 3 ГэВ/нейтрон

Значение переменной	$N_i - N_k$					
	$N_1 - N_3$	$N_3 - N_5$	$N_5 - N_7$	$N_2 - N_4$	$N_4 - N_6$	$N_6 - N_8$
Среднее, нс	-0,79	1,41	0,82	-1,89	0,68	0,36
$\sigma$ , нс	0,38	0,37	0,37	0,63	0,42	0,29
$\sigma/\sqrt{2}$	0,27	0,27	0,30	0,44	0,30	0,20

Рис. 10. Эффективность регистрации нейтронов в зависимости от количества используемых слоев нейтронного детектора (в данном случае — в зависимости от расстояния от переднего края детектора)



На рис. 10 показана эффективность регистрации нейтронов в зависимости от количества используемых слоев нейтронного детектора. Полное число нейтронов, которые направлялись в сторону исследуемого нейтронного детектора, бралось из условия совпадения сигнала со стартового счетчика S1 и сигнала с детектора A3, который регистрирует протон от развала дейтрона на веществе S1. Нейтрон регистрировался исследуемым

детектором в случае совпадений сигналов счетчиков S1, A3 и одного из счетчиков нейтронного детектора и отсутствия сигнала со счетчиков A1 и A2.

При фитировании полиномом точек на рис. 10 первый ненулевой член полинома показывает, что необходимо учитывать дополнительные процессы кроме взаимодействия нейтронов пучка с веществом нейтронного детектора (взаимодействие нейтронов пучка с веществом стоящего перед нейтронным детектором антисовпадательного счетчика или взаимодействие с веществом детектора непучковых нейтронов). В данном случае значение ненулевого первого члена функции фитирования показывает величину сдвига значения эффективности детектора до корректной величины. Эффективность регистрации нейтронов достигает 27 % в случае использования четырех слоев нейтронного детектора.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Собранный прототип нейтронного детектора для установки SCAN-3 был исследован на выведенном дейтронном пучке нуклотрона ЛФВЭ ОИЯИ на установке МАРУСЯ. Показано, что эффективность регистрации нейтронов исследуемым детектором может достигать 27 %. Данный детектор по своим временным характеристикам может быть использован в экспериментальной установке SCAN-3 для регистрации нуклонов в  $\pi n$ - и  $pn$ -каналах распада  $\eta$ -ядра.

Также показана возможность использования экспериментальной установки МАРУСЯ (ЛФВЭ ОИЯИ) в районе фокуса F4 и выведенного  $d$ -пучка нуклотрона в качестве источника нейтронов высоких энергий.

Авторы благодарят Е. В. Ржанова за помощь в измерениях.

Исследование было поддержано Министерством образования, науки, исследований и спорта Словацкой Республики (грант VEGA 1/113/18).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Afanasev S. V. et al. (SCAN Collab.).* New Status of the Project “Eta-Nuclei” at the Nuclotron // Nucl. Phys. B. 2013. V. 245. P. 173–176.
2. *Haider Q., Liu L. C.* Dependence of Calculated Binding Energies and Widths of  $\eta$ -Mesic Nuclei on Treatment of Subthreshold  $\eta$ -Nucleon Interaction // Phys. Rev. C. 2002. V. 66. P. 045208.
3. *García-Recio C., Inoue T., Nieves J., Oset E.*  $\eta$  Bound States in Nuclei // Phys. Lett. B. 2002. V. 550. P. 47.
4. *Pfeiffer M. et al.* Photoproduction of  $\eta$ -Mesic  $^3\text{He}$  // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 92. P. 252001.
5. *Budzanowski A. et al. (COSY-GEM Collab.).* Search for  $\eta$ -Mesic Nuclei in a Recoil-Free Transfer Reaction // Phys. Rev. C. 2009. V. 79. P. 012201.
6. *Балдин А. А. и др.* Экспериментальное исследование асимметрий в инклюзивных спектрах  $\pi^+$ ,  $p$ ,  $d$  при взаимодействии поляризованных протонов и дейтронов с углеродными мишенями на установке МАРУСЯ. Препринт ОИЯИ P1-2007-180. Дубна, 2007.

Получено 11 декабря 2018 г.