

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕТЕКТОРОВ ПЕРЕДНЕЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОЙ СТЕНКИ ЭКСПЕРИМЕНТА VM@N

© 2022 г. А. Г. Баранов^а, В. А. Басков^б, В. К. Василенко^с, Д. П. Герасимов^а,
Ф. Ф. Губер^а, В. А. Дронов^б, А. П. Ивашкин^а, А. В. Известный^а, Н. М. Карпушкин^а,
А. И. Львов^б, С. В. Морозов^а, В. В. Полянский^б, Г. Х. Салахутдинов^{с,*}

^а Институт ядерных исследований РАН
Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Физическая, 27

^б Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

^с Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31

*e-mail: saip07@mail.ru

Поступила в редакцию 20.07.2021 г.

После доработки 02.08.2021 г.

Принята к публикации 21.08.2021 г.

Приведены результаты измерений световыхода и неоднородности светосбора прототипов сцинтилляционных детекторов с поперечными размерами 75×75 мм и 150×150 мм, являющихся элементами сцинтилляционной стенки в установке эксперимента VM@N, предназначенной для измерения зарядов легких фрагментов в столкновениях тяжелых ионов. Измерения были выполнены на электронном пучке синхротрона “Пахра” Физического института им. П.Н. Лебедева РАН.

DOI: 10.31857/S0032816222010025

ВВЕДЕНИЕ

Для определения центральности и ориентации плоскости реакции в ядро-ядерных столкновениях в планируемых экспериментах на установке VM@N (Varionic Matter at Nuclotron) [1], расположенной на выведенном пучке “Нуклотрона” сооружаемого ускорительного комплекса НИКА в ОИЯИ (Дубна), предполагается использовать новый передний адронный калориметр FNCal [2], который уже собран и установлен на этой установке. Пучковое отверстие калориметра FNCal будет перекрываться кварцевым годоскопом, который позволит измерять заряд фрагментов [3], пролетевших в отверстие калориметра. Как показывают результаты моделирования, в этом случае центральность столкновений можно определить из двумерной корреляции между выделенной энергией в калориметре и суммарным зарядом фрагментов, измеренным годоскопом.

В настоящее время исследуется возможность выполнения на установке VM@N отдельных измерений нейтральной и заряженных компонент спектаторной материи. Это позволит более детально исследовать уравнение состояния ядерной материи с высокой барионной плотностью, что также важно для понимания свойств материи в

нейтронных звездах и в процессе коллапса массивных звезд в астрофизике [4].

Для выполнения таких исследований планируется модернизировать существующий передний адронный калориметр с целью использования его в основном для определения энергии нейтронов-спектаторов. Для измерения заряженных компонент спектаторной материи предлагается создать новую сцинтилляционную стенку, структура которой описана в следующем разделе.

ДЕТЕКТОРНАЯ СИСТЕМА УСТАНОВКИ VM@N ДЛЯ РАЗДЕЛЬНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ФРАГМЕНТОВ И НЕЙТРОНОВ

Предлагаемая новая схема расположения передних детекторов установки VM@N показана на рис. 1. Из модулей центральной части существующего калориметра FNCal будет собран калориметр ZDC (Zero Degree Calorimeter), состоящий из 36-ти модулей с поперечными размерами 15×15 см. Данный калориметр будет установлен на расстоянии ~ 9 м от мишени, расположенной на входе анализирующего магнита VM@N, как показано на рис. 1, справа. При номинальном токе в магните пучок заряженных ионов, а также

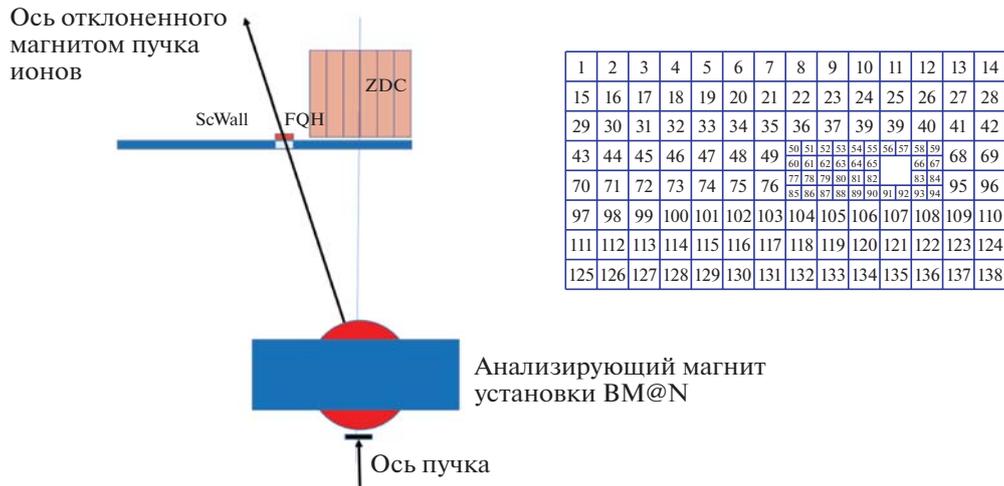


Рис. 1. Слева – схема расположения передних детекторов установки ВМ@N (вид сверху): ZDC – передний адронный калориметр для измерения энергии нейтронов; ScWall и FQH – сцинтиляционная стенка и передний кварцевый годоскоп для измерения заряженных фрагментов соответственно (другие детекторные системы установки ВМ@N на рисунке не показаны); справа – схема сцинтиляционной стенки ScWall.

полученные в мишени заряженные фрагменты отклоняются на достаточно большой угол в горизонтальной плоскости и не попадают в ZDC. Таким образом, ZDC будет в основном измерять энергию нейтронов, попавших в калориметр. Заряженные фрагменты, рожденные в мишени и также отклоненные магнитом, детектируются большой сцинтиляционной стенкой ScWall (Scintillation Wall). Поперечный размер ScWall выбран с учетом результатов моделирования и составляет 270 × 120 см. В центре стенки расположено пучковое отверстие размером 15 × 15 см, в которое проходят невзаимодействующие в мишени ионы пучка. Сцинтиляционная стенка будет состоять из 36-ти малых сцинтиляционных детекторов с поперечными размерами 75 × 75 мм, расположенных вокруг пучкового отверстия, и 134-х больших детекторных ячеек с поперечными размерами 15 × 15 см (см. рис. 1, справа). Толщина сцинтиляционных ячеек составит 10 мм.

Как показывают результаты моделирования, в ZDC, помимо нейтронов, будет попадать небольшое количество заряженных частиц, в основном протонов и пионов, рожденных в мишени. Сцинтиляционная стенка будет также перекрывать всю входную поверхность ZDC, что позволит использовать ее в качестве вето-детектора для заряженных частиц, попавших в калориметр.

Ионы пучка и заряженные фрагменты из мишени, проходящие в пучковое отверстие ScWall, будут измеряться передним кварцевым годоскопом FQH (Forward Quartz Hodoscope), который установлен сразу за ScWall.

КОНСТРУКЦИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРНЫХ ЯЧЕЕК

Для определения параметров детекторных элементов ScWall было изготовлено четыре прототипа сцинтиляционной детекторной ячейки. Для этого использовались сцинтилляторы на полистирольной основе, полученные экструзионным способом компанией “Унипласт” (г. Владимир, Россия).

В двух больших ячейках размером 150 × 150 × 10 мм выполнена спиралеобразная канавка для укладки спектросмещающего (WLS – Wavelength shifting) оптоволоконна. Два других сцинтиллятора размером 75 × 75 × 10 мм имеют кольцеобразную канавку. Геометрии канавок определяются необходимостью иметь радиус закругления WLS-оптоволоконна более 2.5 см, что позволит избежать потери света при его транспортировке по волокну. В канавку вклеены оптоволоконна WLS Y11(200) S-type диаметром 1 мм производства компании Kuraray [5]. Оптический контакт между сцинтиллятором и оптоволоконном обеспечивается клеем EJ500 производства фирмы Eljen Technology [6]. Один конец оптоволоконна, вклеенный в сцинтиллятор, покрыт светоотражающей серебряной краской, а второй конец вклеен в оптический разъем, размещенный в торце сцинтиллятора. Данный разъем также используется для крепления фотодетектора к торцу оптоволоконна.

Сцинтиляционные ячейки имеют различные типы отражателей. Одна пара большой и малой ячеек обернута в белое полотно TYVEK, изготовленное из полиэтилена высокой плотности. Другая пара большой и малой ячеек имеет диффузионный отражатель, образованный в результате

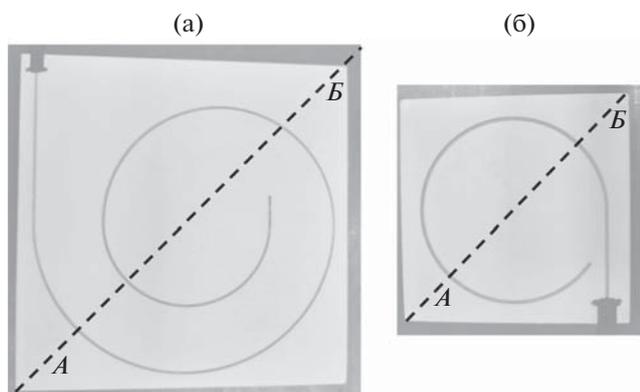


Рис. 2. Фотографии большой (а) и малой (б) сцинтилляционных ячеек. Штриховой линией *АВ* показана траектория сканирования электронным пучком по диагонали ячеек.

травления специальным химическим раствором поверхности детекторов в процессе производства сцинтиллятора.

На рис. 2 показаны фотографии образцов большой и малой сцинтилляционных ячеек, покрытых диффузионным отражателем.

Исследования сцинтилляционных ячеек проводились с помощью космических мюонов и на электронном пучке. В этих тестах свет с оптоволоконна считывался кремниевым фотоумножителем MPPC S13360-1325CS производства компании Hamamatsu (Япония). Данные фотодетекторы имеют площадь активной области $1.3 \times 1.3 \text{ мм}^2$, квантовую эффективность 25% и коэффициент усиления $7 \cdot 10^5$. Сигнал с фотодиода поступал на дополнительный усилитель с полосой пропускания 300 МГц и коэффициентом усиления ~ 200 . Затем форма сигнала с усилителя оцифровывалась аналого-цифровым преобразователем DT5742 производства компании CAEN.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Четыре сцинтилляционные ячейки различных размеров и с разными отражателями были исследованы на тестовом пучке электронов с энергией 280 МэВ синхротрона ФИАН “Пахра” [7]. Основной задачей проводимых тестов было исследование влияния геометрии канавок с вклеенным WLS-оптоволоком и типа отражателя на величину и неоднородность световых выходов в детекторах.

Количество фотоэлектронов

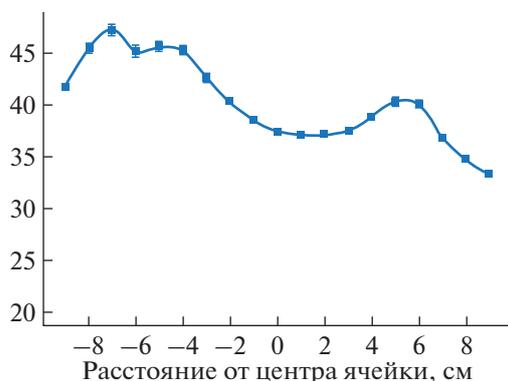
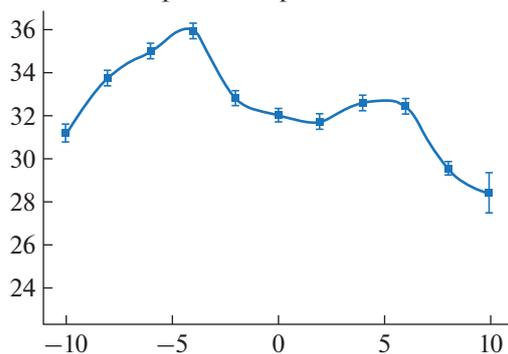
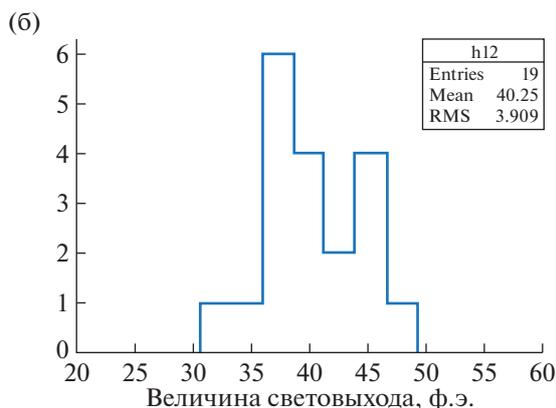
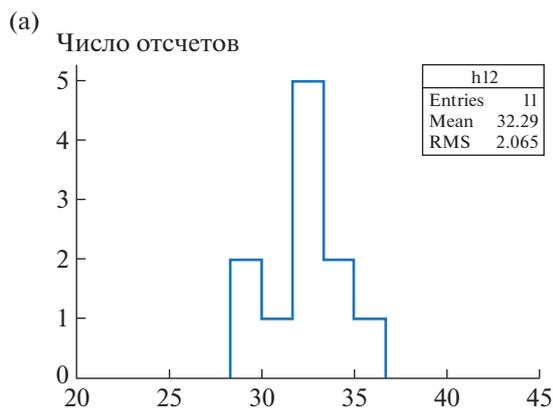


Рис. 3. Результаты измерений большой сцинтилляционной ячейки, покрытой отражателем YUVEK (а) и диффузионным отражателем (б): слева — зависимость светового выхода от точки прохождения пучка по диагонали детектора; справа — гистограмма распределения светового выхода по всем измеренным точкам ячейки.



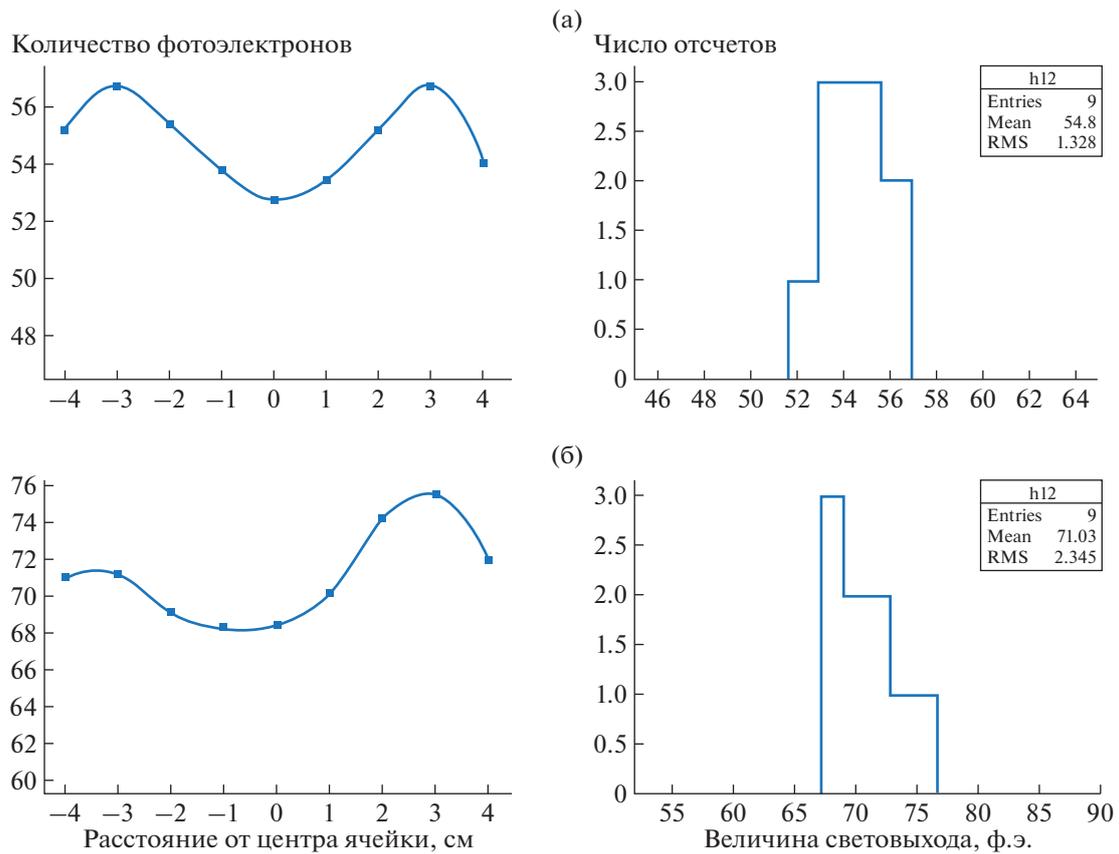


Рис. 4. Результаты измерений малой сцинтилляционной ячейки, покрытой отражателем TYVEK (а) и диффузионным отражателем (б): слева – зависимость светового выхода от точки прохождения пучка по диагонали детектора; справа – гистограмма распределения светового выхода по всем измеренным точкам ячейки.

Триггерным сигналом являлся сигнал от прохождения электронов через два пучковых счетчика размером $10 \times 10 \times 5$ мм каждый. Сцинтилляционные ячейки последовательно помещались на несущую платформу, способную перемещаться в вертикальной и горизонтальной плоскостях перпендикулярно направлению пучка. Сканирование электронным пучком проводилось по диагонали ячеек от точки А до точки В (см. рис. 2).

Результаты измерений больших сцинтилляционных ячеек, покрытых TYVEK и диффузионным отражателями, представлены на рис. 3. Согласно рисунку, в случае диффузионного отражателя световой выход выше и составляет в среднем около 40 фотоэлектронов. Этот же параметр для отражателя TYVEK равен 32 фотоэлектронам. Однако неоднородность светосбора в последнем случае составляет около 6%, что почти в 2 раза лучше, чем для ячейки, покрытой диффузионным отражателем.

Характерные пики на зависимостях световыхода от точки прохождения пучка электронов соответствуют пересечению пучком канавки с WLS-оптоволоконном. В этом случае локальный свето-

сбор становится заметно выше благодаря большей эффективности захвата света оптоволоконном.

Измерения были выполнены также для малых сцинтилляционных ячеек. Результаты измерений показаны на рис. 4 для TYVEK и диффузионного отражателей. Как и в случае с большими детекторами, в случае диффузионного отражателя световой выход выше и составляет в среднем около 71 фотоэлектрона. Световой выход для отражателя TYVEK приблизительно равен 55 фотоэлектронам. Неоднородность светосбора составляет около 2.4% для TYVEK и 3.2% для химического отражателя.

Как и в случае больших ячеек, наблюдаются характерные пики на зависимостях световыхода от точки прохождения пучка электронов, соответствующие пересечению пучком канавки с WLS-оптоволоконном, что отражает большую эффективность захвата света оптоволоконном в данной локальной области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты исследований сцинтилляционных детекторных ячеек для передней

стенки, создаваемой для регистрации протонов и легких ядерных фрагментов, рождаемых в ионных столкновениях в эксперименте BM@N. Детекторы имеют различные геометрические размеры и покрыты отражателями разных типов. Показано, что величина и неоднородность световых выходов сильно зависят как от геометрии канавки с вклеенным WLS-оптоволоком, так и от типа отражателя.

Измерения на тестовом пучке электронов показали, что диффузионный отражатель, образованный в результате травления специальным химическим раствором поверхности сцинтиллятора, обеспечивает световой выход почти на 30% выше, чем отражатель ТУВЕК. Пространственная неоднородность светосбора в малой сцинтилляционной ячейке составляет 2–3% для отражателей обоих типов. Однако в большой ячейке с диффузионным отражателем неоднородность светосбора составляет около 10%, что будет создавать проблемы с идентификацией заряженных ядерных фрагментов. Вместе с тем высокий световой выход, на уровне 70 фотоэлектронов, является избыточным и приводит к ограничению динамического диапазона микропиксельных фотодиодов.

Полученные результаты показывают, что отражатель ТУВЕК является наиболее предпочти-

тельным для использования в качестве светового отражателя во всех сцинтилляционных ячейках передней стенки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kapishin M.* // PoS(CORFU2018). 2019. P. 188. <https://doi.org/10.22323/1.347.0188>
2. *Guber F., Finogeev D., Golubeva M., Ivashkin A., Izvestnyy A., Kapishin M., Karpushkin N., Morozov S., Petukhov O.* // JINST. 2020. V. 15. C05020. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/05/C05020>
3. *Casserly M., Turner N., O'Sullivan J., Bruen M., Bullock H., Atkinson S., Kelly-Quinn M.* // JINST. 2020. V. 15. C09028. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/05/C09028>
4. *Senger P.* // Particles. 2021. V. 4. P. 214. <https://doi.org/10.3390/particles4020020>
5. Kuraray Plastic Scintillating Fibres, <http://kuraray-psy.jp/psy>
6. http://www.eljentechnology.com/images/products/data_sheets/EJ-500.pdf
7. *Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кречетов Ю.Ф., Малиновский Е.И., Павлюченко Л.Н., Полянский В.В., Сидорин С.С.* // ПТЭ. 2019. № 2. С. 5. <https://doi.org/10.1134/S0032816219020162>