

УДК 539.1.074.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТОТИПА ЯЧЕИСТОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА ТИПА “ШАШЛЫК”

Д. Ю. Перейма^{1,2}, Д. Ю. Голубков¹, Ю. П. Гуз³, В. Ю. Егорычев^{1,2},
Ю. М. Зайцев¹, И. Е. Королько¹, М. С. Прокудин¹, П. Б. Шаталов¹

Приводятся результаты измерений неоднородности отклика прототипов гетерогенных ячеистых электромагнитных калориметров. Представлены особенности технологических решений, примененных при разработке исследуемых калориметрических модулей.

Ключевые слова: калориметр, отклик, неоднородность, сцинтиллятор, модуль, энергетическое разрешение, спектросмещающее волокно.

Гетерогенные ячеистые электромагнитные калориметры со спектросмещающими волокнами в качестве системы светосбора (технология “шашлык”), являются надежными и эффективными устройствами для регистрации высокоэнергетичных заряженных частиц и фотонов [1]. Использование спектросмещающих волокон для считывания световых вспышек в сцинтилляционных пластинах и технологическая возможность изготовить сцинтилляторы и абсорберы различных размеров позволяют сконструировать экспериментальные модули с минимальной потерей полезного материала.

Такие калориметры обладают высокими энергетическим разрешением и радиационной стойкостью, а также быстрым откликом. Благодаря ряду преимуществ эти детекторы нашли свое применение в таких крупных экспериментах в физике высоких энергий, как: PHENIX в Брукхейвенской Национальной лаборатории (BNL), LHCb и DELPHI в Европейском центре ядерных исследований (CERN), HERA-B в Немецком национальном центре DESY и многих других [2].

¹ ФГБУ “ГНЦ РФ ИТЭФ”, НИЦ “Курчатовский институт”, 117218 Россия, Москва, ул. Большая Черемушkinsкая, 25; e-mail: Dmitrii.Pereima@cern.ch.

² Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское шоссе, 31.

³ ФГБУ “ГНЦ РФ ИФВЭ”, НИЦ “Курчатовский институт”, 142280 Россия, Московская область, г. Протвино, ул. Победы, 1.

Одним из ключевых факторов, влияющих на энергетическое разрешение модуля, является неоднородность отклика калориметра по поверхности калориметрической ячейки. Например, к электромагнитному калориметру будущего эксперимента SHiP выдвигается строгое требование по разделению мюонов от π -мезонов с высокой эффективностью. Таким образом, разрабатываемый модуль должен обладать достаточным энергетическим разрешением и неоднородность отклика должна быть минимальной.

Энергетическое разрешение калориметрической сборки определяется как относительная ширина пика распределения амплитуды отклика детектора при заданной энергии электронов. Полученное распределение аппроксимируется функцией Гаусса. Полученная зависимость относительной ширины от энергии аппроксимируется функцией:

$$\frac{\sigma_E}{E} = \left(\left(\frac{a}{\sqrt{E}} \right)^2 + b^2 \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где a называется стохастическим членом, b – постоянным [3].

Исследуемые прототипы калориметрических модулей были изготовлены в ИФВЭ (г. Протвино). Всего исследовалось два прототипа: в одном была применена технология спиральной укладки спектросмещающего волокна, во втором спектросмещающее волокно укладывалось по прямой, вдоль всего детектора.

Исследуемый модуль представляет собой параллелепипед с поперечным сечением 38×38 см². Калориметрическая сборка содержит в себе 175 слоев свинца толщиной 0.8 мм и 175 слоев сцинтиллятора толщиной 1.5 мм. Свет к фотоумножителю доставляется матрицей из 4×4 спектросмещающих волокон. Торцы волокон отполированы и собраны в жгут, который с тыльной стороны модуля стыкуется со смесителем света из полистирола размером $10 \times 10 \times 25$ мм³. Для обеспечения механической жесткости модуля использовались стяжные шпильки, пронизывающие весь модуль.

Исследования неоднородности отклика прототипов модулей электромагнитного калориметра проводились на пучке мюонов с энергией 150 ГэВ в экспериментальном холле ускорительного комплекса SPS в CERN летом 2015 года.

Для измерения координат высокоэнергетичных мюонов были использованы 3 пропорциональных камеры. Схема расположений трековых камер представлена на рис. 1.

Для анализа отбирались только хорошо восстановленные треки. Оценка пространственного разрешения камер составила около 170 мкм. Такая точность значительно выше шага разбиения калориметрической ячейки, который составляет 1 мм².

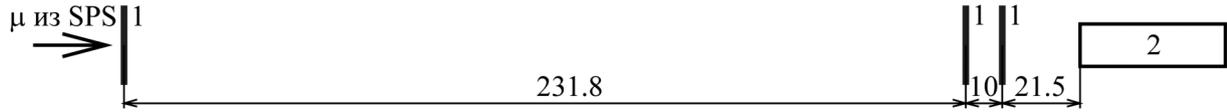


Рис. 1: Схема расположения пропорциональных камер и калориметрического модуля. Все расстояния даны в см. 1 – пропорциональные камеры, 2 – калориметр.

При получении карты неоднородностей для мюонов исследовалась зависимость отклика калориметрической ячейки от координаты точки входа частицы. Поверхность ячейки была разбита на квадратные сегменты площадью $1 \times 1 \text{ мм}^2$, в каждой из которых было построено индивидуальное распределение мюонного сигнала. Полученные распределения сигнала аппроксимировались функцией Ландау (см. рис. 2).

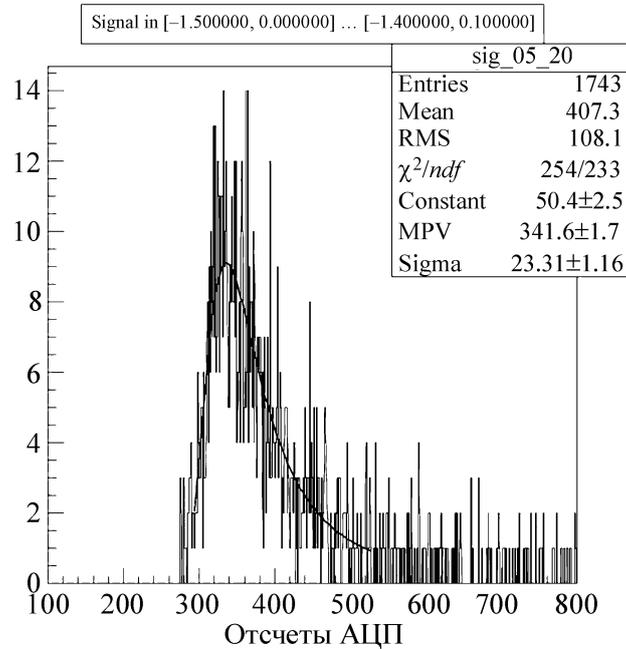


Рис. 2: Распределение мюонного сигнала для одного сегмента калориметрической ячейки.

Положения максимумов полученных распределений помещались в двумерную гистограмму, которая и является картой неоднородности отклика калориметра для мюонов. Полученные карты неоднородности для модулей с прямыми и спиральными волокнами показаны на рис. 3.

В центре модулей виден резкий подъём отклика, вызванный черенковским излучением, возникающим при прохождении мюоном смесителя света. Падение отклика вблизи

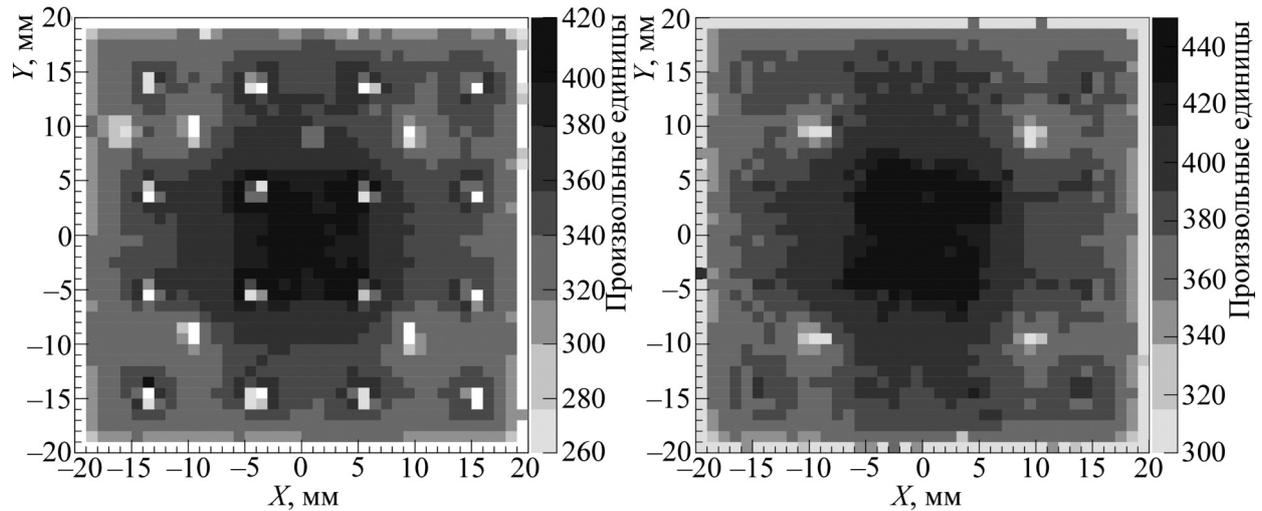


Рис. 3: Неоднородность отклика на высокоэнергичные мюоны прототипов с прямым (слева) и со спиральным (справа) расположением волокон.

границ светоизолированной ячейки связано с утечкой энергии из области ионизации через боковые торцы модуля.

Падение отклика с координатами (± 1 см; ± 1 см) (см. рис. 3) вызваны мертвым веществом стальных спиц. Поведение отклика вблизи спектросмещающих волокон различно для двух прототипов. У прототипа с прямыми волокнами наблюдается увеличение световых выходов вблизи волокна и резкое падение при попадании мюона непосредственно в волокно или отверстие около него. Прототип со спиральными волокнами демонстрирует лучшую однородность отклика без провалов, лишь с небольшими подъемами около спектросмещающих волокон.

По результатам проведенных исследований можно подвести следующие итоги: стальные шпильки теряют свою механическую упругость с течением времени. Однако благодаря наличию стяжных гаек на переднем торце модуля элементы детектора можно стянуть вместе, обеспечивая тем самым прочность и жесткость конструкции на протяжении длительного времени. Недостатком является то, что металлические шпильки вносят большой объем “мертвого” вещества в чувствительную зону детектора, более того, шпильки располагаются вдоль зоны с низким откликом и не защищают боковые стенки модуля от повреждений.

Спиральный метод укладки спектросмещающих волокон демонстрирует лучшую (на 10–15%) однородность для мюонов, налетающих нормально к поверхности модуля. Применение этой технологии интересно лишь в том случае, когда угол вхождения ча-

стиц в детектор достаточно мал, если же угол вхождения частицы составляет более 3° , то применение данной технологии нецелесообразно, т.к. вероятность движения частицы в спектросмещающем волокне вдоль всего модуля крайне мала. Более того, спиральная укладка волокна значительно усложняет процесс производства модулей и увеличивает трудозатраты. В процессе укладки на волокне появляются насечки и дефекты из-за трения с краями свинцовых и сцинтилляционных пластин.

В целом проведенные исследования прототипов электромагнитных калориметров предоставляют возможность сравнения и выбора необходимой технологии при разработке калориметрического комплекса эксперимента SHiP.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] G. S. Atoyan et al., Nucl. Instrum. Meth. **A320**, 144 (1992).
- [2] A. Arefiev et al., LHCb Public Note **LHCb 2007–148**, 18 (2007).
- [3] М. Н. Хачатурян, Физика элементарных частиц и атомного ядра (ОИЯИ) **34(5)**, 1362 (2003).

По материалам V Международной молодежной научной школы-конференции “Современные проблемы физики и технологий”.

Поступила в редакцию 12 июля 2016 г.