

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПОВ ПРЕДЛИВНЕВОГО ДЕТЕКТОРА ЭКСПЕРИМЕНТА LHCb

© 2012 г. Ю. К. Гаврилов, Е. Н. Гушин, С. В. Лаптев,
В. Е. Постоев, С. Н. Филиппов

*Институт ядерных исследований РАН
Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а
E-mail: guschin@inr.ru*

Поступила в редакцию 30.11.2011 г.

Представлены результаты разработки и экспериментального исследования прототипов предливневого детектора установки LHCb на тестовых пучках ускорителя SPS (CERN). Предливневый детектор состоит из двух слоев ячеек сцинтиллятора и слоя свинцового конвертора между ними. Свет из ячеек считывается с помощью спектросмещающего волокна, клеенного в круговую канавку в несколько витков. Изучение прототипов позволило выбрать оптимальный вариант светосбора и конструкции модулей предливневого детектора.

ВВЕДЕНИЕ

Сцинтилляционно-ячеистый (с.я.д.) и предливневый (п.д.) детекторы являются частью калориметрической системы установки LHCb [1, 2]. Их основное назначение – усиление разделения электронов, фотонов и адронов в триггере нулевого уровня в дополнение к электромагнитному калориметру. Конструктивно сборка этих детекторов представляет собой две плоскости сцинтилляционных ячеек, разделенных плоскостью свинцового конвертора. Первый по направлению движения частиц слой сцинтиллятора является с.я.д., который предназначен для разделения заряженных и нейтральных частиц. Второй слой сцинтиллятора образует п.д., по величине сигнала в котором производится разделение электромагнитных и адронных ливней. Толщина свинцового конвертора составляет 14 мм (2.5 радиационных длин). Информация с с.я.д. и п.д. используется как в триггере нулевого уровня, так и при обработке результатов измерений для идентификации частиц и коррекции энергетического разрешения электромагнитного калориметра. Различаясь электроникой считывания сигнала, с.я.д. и п.д. идентичны по конструкции. Основными компонентами детекторов являются ячейки из пластического сцинтиллятора, считываемые спектросмещающими волокнами (с.с.в.), клееными в канавки в сцинтиляторе. Для минимизации потерь света с.с.в. состыковываются через оптический разъем с прозрачным волокном, по которому световой сигнал транспортируется к фотоприемнику.

В данной работе представлены результаты тестовых испытаний прототипов с.я.д. и п.д., целью проведения которых было определение опти-

мальной конструкции ячеек, включая выбор способа обработки поверхности сцинтиллятора и количества витков волокна в канавке. В качестве фотоприемника использован многоанодный ф.э.у. (HAMAMATSU R5900 [4]). Приведены также результаты измерений на тестовых пучках электронов, мюонов и π -мезонов комбинированных прототипов модулей с.я.д. и п.д. совместно с прототипами модулей электромагнитного и адронного калориметров.

КОНСТРУКЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДЛИВНЕВОМУ ДЕТЕКТОРУ УСТАНОВКИ LHCb

Подробное описание конструкции с.я.д. и п.д. приведено в работе [1]. Каждая плоскость детекторов состоит из внутренней, средней и внешней зон с размерами ячеек 40×40 мм, 60×60 мм и 120×120 мм соответственно. Конструктивно ячейки собираются в матрицы 16×16 , 8×8 и 4×4 и упаковываются в модули размерами 48×48 см.

Основные требования к предливневому детектору можно сформулировать следующим образом:

- разделение электронов и π -мезонов с вероятностью регистрации электронов 95% при остаточной доле π -мезонов $\leq 10\%$;
- эффективность регистрации минимально-ионизирующей заряженной частицы (м.и.ч.) при пороге 0.5 от наиболее вероятной величины сигнала должна быть $\geq 95\%$;
- длительность сигнала по времени должна соответствовать циклу ускорителя 25 нс с интегральной долей сигнала в воротах 25 нс не менее 75% от общей величины;

– совместное энергетическое разрешение с.я.д. и п.д. с электромагнитным калориметром типа “шашлык” должно быть не хуже $\sigma_E/E = 10\%/\sqrt{E} + 1.5\%$.

Чтобы удовлетворить перечисленным требованиям, световой выход должен быть не менее 15–20 ф.э./м.и.ч.

ОПТИМИЗАЦИЯ СВЕТОСБОРА В ЯЧЕЙКЕ СЦИНТИЛЛЯТОРА

Выбор оптимального варианта расположения с.с.в. в канавке и геометрии канавки зависит от размеров ячейки и такого свойства самого сцинтиллятора, как объемная прозрачность, а также от качества инструментальной обработки поверхностей ячейки и канавки, качества оптического контакта между волокном и сцинтиллятором. Для того чтобы определить оптимальный вариант с максимальным светосбором при достаточно коротком временном отклике, нами были изготовлены и измерены около 100 ячеек с различными конфигурациями канавки, типами волокна и сцинтиллятора, вариантами светоотражающих оберток и оптического контакта между сцинтиллятором и волокном.

Несмотря на значительное число изученных вариантов ячеек, этого количества недостаточно, чтобы претендовать на систематическое исследование эффективности светосбора как функции комбинации всех возможных параметров, таких как размеры ячейки, геометрия канавки, количество витков волокна и т.д. Поэтому целью данной работы было сравнение нескольких вариантов, близких к выбранной “рабочей точке”. Так, мы сравнивали комбинации всего двух вариантов толщин сцинтиллятора, двух типов канавок, двух типов сцинтиллятора и нескольких вариантов обработки поверхностей ячеек, чтобы выбрать среди них оптимальную.

Выбор варианта геометрии канавки. Конструкция прототипов ячеек

Изучение светосбора в сцинтилляционных ячейках с помощью с.с.в. проводилось многими группами исследователей [3]. Некоторые из них, такие как детекторные группы экспериментов CMS, CDF, OPAL, оптимизировали геометрию канавок для ячеек существенно большего размера, чем ячейки в с.я.д. и п.д. для LHCb. В других экспериментах, таких как WA93 или WA98, ячейки сцинтиллятора, сравнимые по размерам с требуемыми для LHCb, считывались прямыми волокнами. Такой вариант требует большего числа волокон, чем вариант с изогнутыми канавками. Оптимизация светосбора путем моделирования методом Монте-Карло требует точного знания всех параметров

оптической модели, что само по себе является трудной экспериментальной задачей. Поэтому нами были изготовлены и изучены на тестовом пучке X7 (CERN) несколько вариантов прототипов. Основная идея заключалась в оптимизации следующих параметров конструкции ячейки:

– количества витков волокна в кольцевой канавке: учитывались, с одной стороны, эффективность светосбора, а с другой – длительность сигнала по времени, возрастающая с увеличением длины волокна в сцинтилляторе;

– геометрии канавки: сравнивались два варианта (рис. 1): кольцевая канавка с витками волокна, уложенными один на другой по глубине канавки, и спиральная канавка, проходящая сквозь ячейку сцинтиллятора (см. также рис. 2);

– толщины сцинтиллятора: сравнивались два варианта – 10 и 15 мм;

– типа сцинтиллятора: BC408 [5] на основе поливинилтолуола и сцинтиллятор российского производства на основе полистирола;

– типа с.с.в.: сравнивались два типа: Y11(250)MSJ [6] и VCF91A-MC [5];

– способа обработки поверхности сцинтиллятора: а) полированная поверхность, обернутая светоотражающей бумагой типа TYVEK, б) полированная поверхность с алюминизированными боковыми сторонами и в) химически обработанная поверхность с диффузным внутренним отражением света;

– вида оптического контакта между волокном и внутренней поверхностью канавки сцинтиллятора: а) оптический клей BC-600 [5], б) оптическая смазка BC-630 [5] и в) воздушный контакт.

Для измерений использовались ячейки размерами 40 × 40 мм и 120 × 120 мм.

Основные варианты геометрии канавки, применявшиеся в конструкции прототипов ячеек с.я.д. и п.д., показаны на рис. 1 и 2. Сравнивались два наиболее перспективных, с нашей точки зрения, варианта: 1) кольцевая глубокая канавка (к.к.), выфрезерованная на большой стороне ячейки, в которую укладываются один на другой витки волокна, и 2) спиральная канавка (с.к.), по которой волокно проходит с одной стороны ячейки на другую сквозь сцинтиллятор. В последнем случае ячейка состоит из двух частей: внутренней цилиндрической части и внешней части, с внутренней стороны которой вырезана спиральная канавка под волокно. Для улучшения оптического контакта между волокном и сцинтиллятором канавка в некоторых прототипах заполнялась клеем BC-600 или оптической смазкой BC-630.

Светосбор для этих двух вариантов геометрии канавки определяли в различных комбинациях с другими параметрами, такими как размеры ячейки, тип сцинтиллятора и количество оборотов волокна.

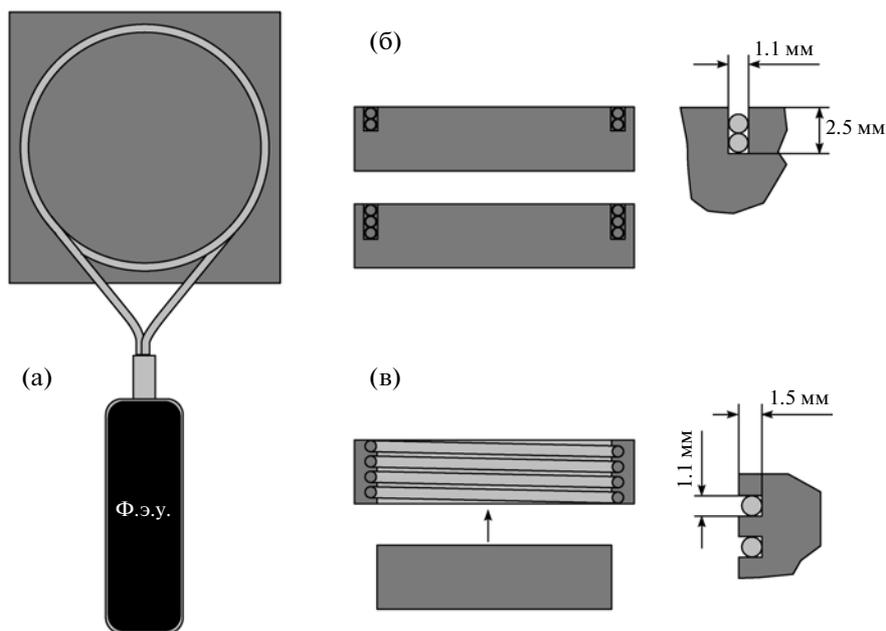


Рис. 1. Конструкция прототипов ячеек с.я.д. и п.д. с двумя вариантами канавки: **а** – ячейка сцинтиллятора с вклеенным в кольцевую канавку волокон в сборе с ф.э.у.; **б** – сечение ячейки с кольцевой канавкой с двумя (вверху) и тремя (внизу) витками волокна; **в** – сечение ячейки со спиральной канавкой, проходящей по внутренней поверхности цилиндрического отверстия $\varnothing 35$ мм. В случае (**в**) ячейка состоит из двух частей сцинтиллятора: внешней части с отверстием посередине и внутренней цилиндрической вставки.

Экспериментальная установка и метод измерения

Измерения проводили на вторичном пучке X7 ускорителя SPS (CERN) на мюонах с энергией 120 ГэВ и электронах с энергией 50 ГэВ. Импульсное разрешение пучка $\Delta p/p \approx 1\%$. Поперечный размер пучка составлял ~ 4 см в диаметре со статистически равномерной засветкой внутри этой области. Однородность световых выходов для ячеек размером 40×40 мм измеряли при засвечивании ячейки полным пучком, при этом координаты попадания пучковых частиц в ячейку вычислялись по информации с пучковых камер. Координатное разрешение треков на входе в тестируемую ячейку составляло ~ 0.3 мм. Угловой разброс треков в пучке не превышал $3 \cdot 10^{-4}$ рад. Для изучения светосбора с помощью дополнительного пучкового счетчика из пучка выделялись частицы в области размером 20×20 мм. Однородность световых выходов для ячеек размером 120×120 мм измеряли при перемещении ячейки относительно пучка. При измерениях в качестве фотодетектора использован один и тот же для всех ячеек фотоприемник ФЭУ-85 российского производства. Квантовая эффективность по результатам измерений составила $\sim 13\%$ на длине волны 500 нм. Несмотря на то что при всех измерениях использовалось одно и то же высокое напряжение на ф.э.у., усиление ф.э.у. непрерывно мониторировалось по сигналу от радиоактивного источника ^{238}Pu низкой интенсивности, напыленного на

кристалл $\text{YAlO}_3:\text{Ce}$ малых размеров, приклеенный оптически прозрачным клеем ближе к краю на входное окно фотоумножителя.

Все изучаемые прототипы были подготовлены к измерениям следующим образом. Концы волокон были обрезаны на длине 10 см от края ячейки, собраны вместе, вклеены в полый цилиндр из оргстекла и на выходе отполированы. Изучаемый прототип закреплялся в рабочем положении на пучке, и концы волокон соединялись с входным окном ф.э.у. с использованием оптической смаз-

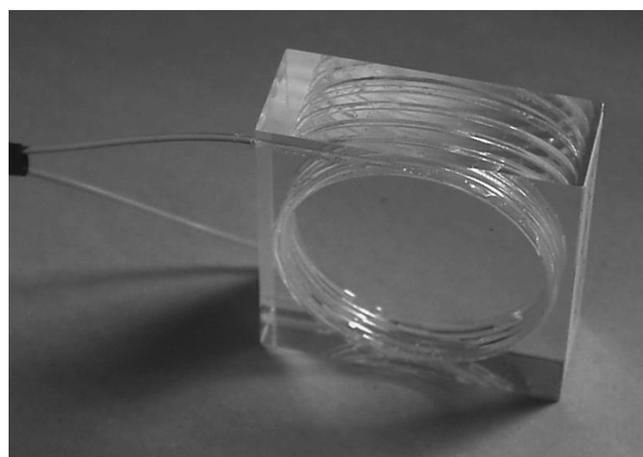


Рис. 2. Прототип ячейки $40 \times 40 \times 15$ мм со спиральной канавкой, 4.5 витка.

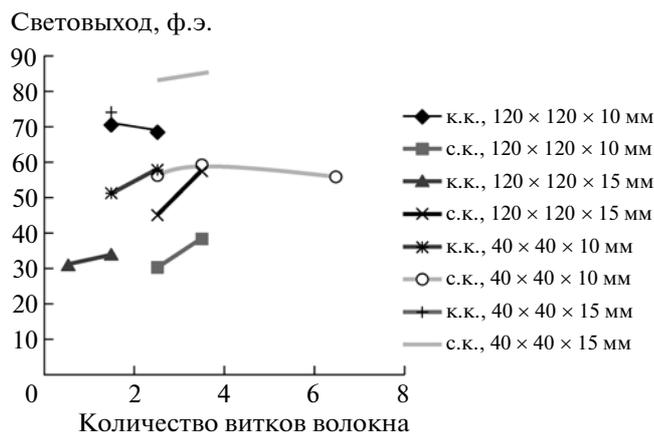


Рис. 3. Световойход ячеек из сцинтиллятора на основе п.с. в зависимости от числа витков волокна. Оптический контакт между волокном и сцинтиллятором отсутствует. Тип волокна VCF91A(MC).

ки BC-630, позволяющей улучшить оптический контакт на ~10%. Воспроизводимость оптического контакта нами была оценена в ~5% (r.m.s.), поэтому все значимые результаты усреднялись по серии из 4-5 измерений.

Для измерений сигнала с ф.э.у. были использованы 11-битные аналого-цифровые преобразователи (а.ц.п.) LeCroy ADC-2249A. Интегрирование амплитуды сигнала осуществлялось в воротах длительностью 150 нс. Длина сигнального коаксиального кабеля от ф.э.у. до преобразователей составляла 30 м, что не вносило существенных искажений в частотные характеристики сигнала. Метод измерения световыхода как числа фотоэлектронов, соответствующего максимально вероятному значению сигнала от м.и.ч., заключался в предварительной калибровке тракта ф.э.у. и измерительной электроники с помощью стандартной процедуры измерения относительной ширины сигнала от быстрого светодиода. Для оценки количества фотонов в сигнале также учитывались квантовая эффективность и относительные флуктуации единичного усиления ф.э.у., составляющие для ФЭУ-85 фактор ~1.5.

Результаты измерений световыхода прототипов ячеек

В первой серии измерений сравнивался световойход ячеек, изготовленных из сцинтиллятора российского производства на основе полистирола методом полимеризации с добавками 2% РТР и 0.03% РОРОР. Все поверхности сцинтиллятора были отполированы. В данных прототипах использовалось волокно VCF91A(MC). Сравнивались варианты геометрии канавки: с.к. и к.к. — для различного числа витков волокна. При этом между волокном и сцинтиллятором не использо-

вались ни оптический клей, ни оптическая замазка. Все ячейки были обернуты двойным слоем синтетической бумаги типа TYVEK толщиной 0.15 мм. Результаты измерений приведены на рис. 3, анализ которого, в частности, показывает, что для ячеек меньшего размера световойход растет медленнее с увеличением числа витков волокна. Это можно объяснить большими потерями света при меньшем радиусе изгиба волокна. Полное число витков получается из-за того, что оба конца волокна выходят из сцинтиллятора в одном направлении. Согласно рис. 3, геометрия канавки (с.к. или к.к.) не влияет существенно на световойход. Увеличение толщины сцинтиллятора приводит к почти пропорциональному росту световыхода.

Во второй серии измерений изучалось влияние на светосбор условий отражения света на поверхностях ячейки. Сравнивались ячейки с алюминизированными боковыми поверхностями, при этом их большие поверхности были отполированы и покрыты TYVEK и ячейки с химически модифицированными поверхностями, что создавало условия диффузного внутреннего отражения. Потенциальное преимущество этих вариантов по сравнению с покрытием TYVEK — отсутствие щелей между ячейками, тогда как в случае с TYVEK щель может достигать 0.5 мм. Согласно результатам измерений, химическая обработка поверхностей ячеек размером 40 × 40 мм дает такой же результат, как и покрытие TYVEK, тогда как в случае ячеек 120 × 120 мм покрытие TYVEK обеспечивает на 30% больше света. Применение химической обработки поверхностей ячеек требует дополнительного изучения эффектов старения поверхности, связанных с такой обработкой. Алюминизация боковых поверхностей приводит к существенным потерям собирания света (20–50%) по сравнению с покрытием TYVEK. Возможно, нам не удалось достичь высокого качества напыления алюминия.

Применение оптических клея BC-600 или замазки BC-630 для улучшения оптического контакта между канавкой и волокном Y11(250)MSJ показало, что как клей, так и замазка позволяют увеличить светосбор до 30% по сравнению с вариантом “сухой” канавки.

Также сравнивались комбинации различных сцинтилляторов (из полистирола (п.с.) и поливинилтолуола (п.в.т.)) и волокон (Y11(250)MSJ и VCF91A). Данные приведены в таблице. Как и ожидалось, сцинтиллятор из п.в.т. дает в ~1.5 раза больший световойход, чем сцинтиллятор из п.с. Однако существенно более низкая стоимость производства, устойчивость к механической обработке и долговременная стабильность качества поверхностей дают преимущество сцинтиллятору из п.с. Поэтому в качестве основного варианта был выбран п.с.-сцинтиллятор, а меньший свето-

Сравнение световыходов для разных типов сцинтиллятора и волокна при различных размерах ячеек, геометрии канавки и вида оптического контакта волокна с поверхностью канавки. Стороны ячеек полированы и обернуты ТУВЕК

Количество витков волокна	Геометрия канавки	Размер ячейки, мм	Тип сцинтиллятора	Тип волокна	Тип оптического контакта	Световыход, ф.э.
2.5	к.к.	120 × 120 × 10	BC-408	BCF91A	BC-630	71
3.5	к.к.	120 × 120 × 10	BC-408	BCF91A	BC-630	69
2.5	к.к.	40 × 40 × 10	BC-408	BCF91A	BC-630	90
3.5	к.к.	40 × 40 × 10	BC-408	BCF91A	BC-630	91
2.5	к.к.	40 × 40 × 10	п.с.	Y11	BC-630	65
2.5	с.к.	40 × 40 × 10	п.с.	BCF91A	BC-600	63
3.5	к.к.	40 × 40 × 10	BC-408	BCF91A	BC-600	90
3.5	с.к.	40 × 40 × 10	BC-408	BCF91A	BC-600	90
1.5	к.к.	40 × 40 × 15	п.с.	Y11	BC-600	85
2.5	с.к.	40 × 40 × 15	п.с.	Y11	BC-630	110
3.5	с.к.	40 × 40 × 15	п.с.	BCF91A	BC-600	105
3.5	с.к.	40 × 40 × 15	п.с.	Y11	BC-600	102
3.5	с.к.	40 × 40 × 15	п.с.	Y11	BC-630	109

выход может быть компенсирован увеличением толщины ячейки до 15 мм.

По результатам измерений световыходов прототипов ячеек были сделаны следующие выводы.

1. Световыход ячеек размером 40 × 40 мм и 120 × 120 мм при одинаковом числе витков волокна соотносится примерно как 3:2.

2. Световыход приблизительно пропорционален толщине ячейки: для ячеек толщиной 10 и 15 мм отношение световыходов составляет ~2:3.

3. Геометрия канавки – с.к. или к.к. – не влияет на световыход при одинаковом числе витков волокна.

4. Применение оптических клея BC-600 или замазки BC-630 для улучшения оптического контакта между волокном и канавкой сцинтиллятора позволяет повысить световыход на ~30% по сравнению с воздушным оптическим контактом.

5. Сцинтиллятор BC408 на основе п.в.т. дает в ~1.5 раза больше света по сравнению с обычным сцинтиллятором на основе п.с.

6. Полированные ячейки размером 40 × 40 мм, обернутые двойным слоем ТУВЕК, дают такой же световыход, как и химически обработанные. Для ячеек размером 120 × 120 мм покрытие ТУВЕК обеспечивает больший световыход. Алюминизация боковых сторон ячеек ухудшает световыход.

7. Увеличение количества витков волокна в канавке до 3-4 повышает световыход, но одновременно увеличивает длительность сигнала. В качестве оптимального варианта для ячеек предливневого детектора мы выбрали 3.5 витка волокна.

8. Для ячейки размером 40 × 40 × 15 мм с 4.5 витками волокна световыход составил ~105 ф.э./м.и.ч. Распределение сигналов от электронов с энерги-

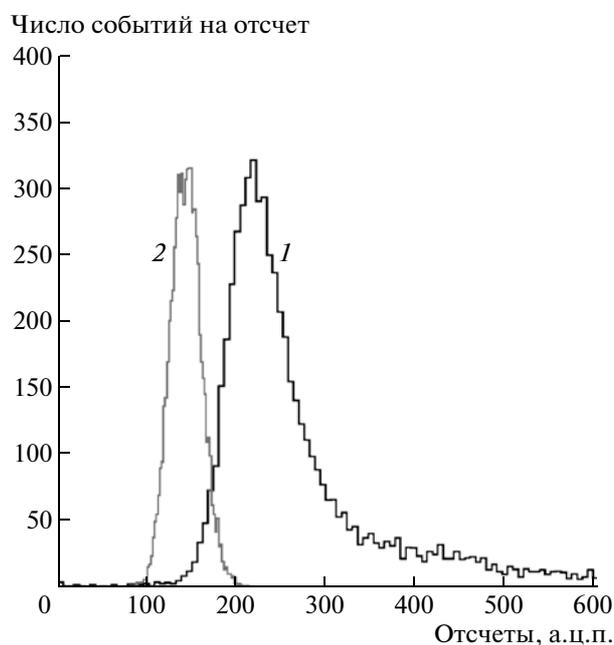


Рис. 4. Распределение сигналов от электронов (1) с энергией 50 ГэВ в ячейке 40 × 40 × 15 мм из сцинтиллятора на основе п.с.; 4.5 витка волокна Y11(250)MSJ диаметром 1 мм вклеены в спиральную канавку (см. рис. 2). Сигнал от светодиода (2) соответствует ~70 ф.э., для наиболее вероятного значения сигнала от электронов (1) оценка световыхода дает ~105 ф.э.

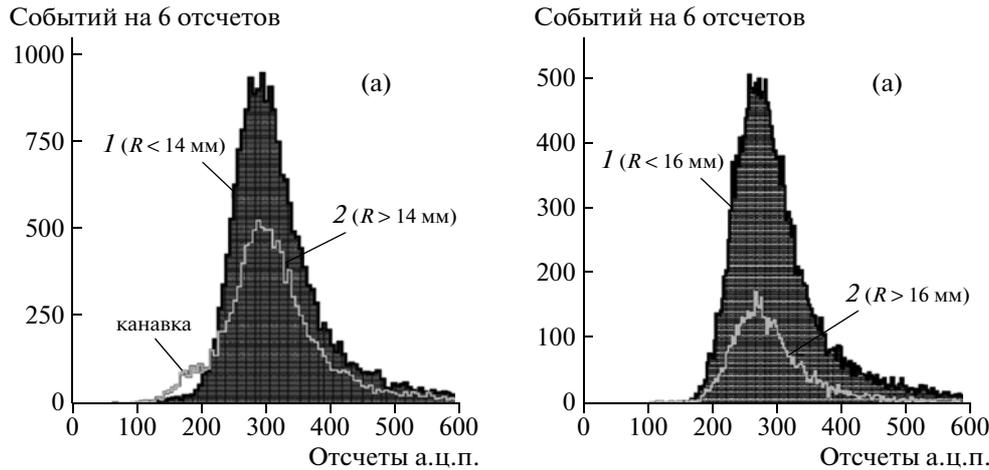


Рис. 5. Распределения сигналов от мюонов с энергией 120 ГэВ: **а** — для ячейки $40 \times 40 \times 10$ мм из сцинтиллятора ВС-408 с 3.5 витками волокна, вклеенного в канавку глубиной 5 мм; **б** — для ячейки $40 \times 40 \times 15$ мм из сцинтиллятора на основе п.с. с 2.5 витками волокна в канавку глубиной 4 мм. Распределения 1 соответствуют прохождению частиц во внутренней части ячеек, 2 — во внешней части ячеек. R — расстояние от точки прохождения мюона до центра ячейки. Видно падение сигнала в области канавки ячейки на рис. 5а.

ей 50 ГэВ и калибровочного светодиода показано на рис. 4.

9. Спектрсмещающие волокна Y11(250)MSJ и VCF91A дают примерно одинаковый световыход, однако волокно Y11(250)MSJ обладает значительно лучшей механической устойчивостью к изгибам и долговременной стабильностью.

Измерение однородности световыхода по поверхности ячеек

Для ячеек размером 120×120 мм можно ожидать неоднородность световыхода, связанную с объемной прозрачностью сцинтиллятора. Нами измерялись сигналы от электронов с энергией 50 ГэВ при двух положениях пучка: в углу и в центре ячейки. Поперечный размер пучка позволял изучить область ячейки 2×2 см. Две ячейки были отполированы и обернуты в ТУВЕК, волокно было уложено в глубокие круговые канавки в 2.5 и 3.5 витка и заклеено клеем ВС-600. Было обнаружено, что в центре средний отклик был меньше на 6–7%, чем в углу ячеек. Отклик для частиц, проходящих в области канавки, детально изучался на ячейках размером 40×40 мм.

Для ячеек размером 40×40 мм однородность световыхода измерялась на пучке мюонов с энергией 120 ГэВ. Координаты прохождения частиц через ячейку измерялись с точностью 0.5 мм по вертикали и 3 мм по горизонтали.

Так как в ячейке такого небольшого размера при толщинах 10 и 15 мм свет хорошо замешивается, то ожидаемыми факторами, влияющими на количество собираемого света от проходящей заряженной частицы, являются неоднородность светосбора вблизи волокна и меньшая толщина

сцинтиллятора в области канавки. При этом требуется изучение сигнала как около, так и внутри канавки, где эти факторы работают противоположным образом: вблизи волокна эффективность светосбора увеличивается, но относительная толщина сцинтиллятора с учетом толщины ячейки и глубины канавки может быть на 20–50% меньше.

На рис. 5 показано амплитудное распределение сигналов для двух вариантов ячеек. Распределения 1 соответствуют прохождению частиц во внутренней области по отношению к канавке (радиус канавки равен 17.5 мм) на расстоянии от центра ячеек меньше 14 мм (рис. 5а) и меньше 16 мм (рис. 5б). Распределения 2 соответствуют прохождению частиц во внешней области, включающей канавку. Небольшой прилив для распределения 2 на рис. 5а в области малых амплитуд соответствует частицам, прошедшим через область канавки. Для ячейки на рис. 5б этот эффект отсутствует.

По результатам измерений неоднородности отклика в исследованных ячейках можно сделать следующие выводы:

- 1) изменение среднего отклика по ячейке 120×120 мм не превышает 3% (г.м.с.), средний отклик в центре ячейки на ~7% меньше, чем в углу;
- 2) общая неоднородность светосбора в ячейках размером 40×40 мм меньше, чем в ячейках 120×120 мм;
- 3) падение сигнала в области канавки тем меньше, чем больше толщина ячейки, меньше глубина канавки и меньше число витков волокна;
- 4) эффект падения сигнала в области спиральной канавки несколько больше из-за дополни-

тельных потерь толщины пластика и утечек в зазоре между частями сцинтиллятора;

5) конструкция ячейки с 2.5–4.5 витками волокна в глубокой канавке обеспечивает однородность световыхода >97% и эффективность регистрации >95% при пороге 0.5 м.и.ч.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ЯЧЕЙКИ ДЕТЕКТОРА

Выбор типа сцинтиллятора

Световыход сцинтиллятора ВС-408 на основе п.в.т. в ~1.5 раза больше, чем на основе п.с. Однако п.с.-сцинтиллятор существенно дешевле в производстве и проще в обработке. Так, наш опыт работы со сцинтиллятором ВС-408 показал, что даже тщательная фрезеровка и полировка не гарантируют, что в процессе обработки и при дальнейшем старении не возникнут микротрещины (“мороз”) на поверхности, что критически влияет на светосбор. Поэтому предпочтительнее использовать сцинтиллятор на основе п.с., увеличив толщину ячейки, как, например, в нашем случае, с 10 до 15 мм.

Выбор толщины ячейки

Измерения прототипов детекторов толщиной 10 и 15 мм подтвердили, что световыход приблизительно пропорционален толщине сцинтиллятора. Механическая конструкция с.я.д. и п.д. позволяет увеличить толщину сцинтиллятора до 15 мм, однако дальнейшее увеличение толщины ограничено геометрией всей установки. Повышение вероятности срабатывания двух соседних ячеек в случае наклонных треков с ростом толщины ячейки будет существенным только для очень больших углов, не типичных для условий эксперимента. Световыход является наиболее критичным параметром, поэтому оптимальной будет толщина сцинтиллятора 15 мм.

Выбор типа спектросмещающего волокна

Волокно Y11(250)MSJ [7] является единственным на рынке, удовлетворяющим требованиям: а) высокого световыхода, б) механической стабильности и устойчивости к требуемым изгибам радиусом до 17.5 мм, в) радиационной стойкости до 1 Мрад и г) достаточно быстрого времени свечивания.

Выбор числа витков волокна в канавке

С ростом числа витков количество перехватываемого волокном света увеличивается, но не пропорционально, а начинает быстро насыщаться при числе витков более трех в силу того, что длина затухания в изогнутом волокне значитель-

но меньше (100 см при радиусе изгиба 5 см [7]) и с увеличением радиуса изгиба уменьшается еще больше. С другой стороны, длительность сигнала возрастает с увеличением длины волокна в канавке, что противоречит требованию быстродействия. Нужно также учесть, что увеличение глубины канавки приводит к неоднородности сигнала, как было отмечено выше. Таким образом, нами выбрано оптимальное число витков волокна 3.5.

Выбор типа канавки

Измерения показали, что светосбор для исследованных вариантов канавки различается незначительно, поэтому в итоге был выбран вариант с кольцевой канавкой как значительно более технологичный.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОТОТИПОВ МОДУЛЯ

Изучаемые прототипы

На основе изложенных выше результатов исследования по оптимизации ячеек нами были изготовлены и изучены на тестовом пучке X7 (CERN) два прототипа модуля с.я.д. и п.д. Основная задача заключалась в изучении технологических особенностей модулей детектора и экспериментальном исследовании характеристик прототипов с.я.д. и п.д. совместно с прототипами модулей электромагнитного и адронного калориметров.

Прототипы модулей с.я.д. и п.д. состоят из внутренней матрицы 3 × 3 ячеек размером 4 × 4 см и восьми окружающих их ячеек размером 12 × 12 см, упакованных в коробку из углепластика с толщиной стенки 250 мкм. Модули идентичны, за исключением толщины и типа сцинтиллятора: один модуль укомплектован ячейками из сцинтиллятора ВС-408 толщиной 10 мм, другой – ячейками на основе полистирола толщиной 15 мм.

Ячейки были изготовлены из полированного сцинтиллятора с круговой канавкой глубиной 4 мм и с примыкающими по касательной наклонными канавками для входа и выхода волокна. В канавки клеивались один на другой 3.5 витка волокна Y11(250)MSJ диаметром 1 мм. Использовался двухкомпонентный оптический клей ВС-600. Каждый конец волокна длиной ~30 см клеивался в оптический разъем и полировался. Разъем служил для подсоединения прозрачного волокна длиной 3 м, обеспечивающего транспортировку света к 64-анодному ф.э.у. R5900-064 (HAMAMATSU). Для сопряжения с ф.э.у. концы прозрачных волокон собирались на оптический разъем с 64 парами отверстий, каждая пара отверстий соединяла отдельную ячейку со своим анодом (пикселом). Размер одного пиксела ф.э.у. равен 2 × 2 мм, что позволяло подсоединять к нему

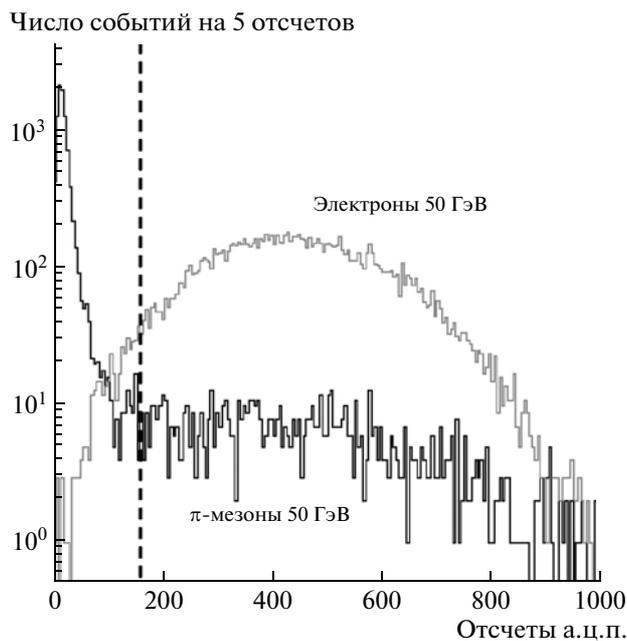


Рис. 6. Распределение сигналов от электронов и π -мезонов с энергией 50 ГэВ в предливневом детекторе. Пунктиром показан 95%-ный порог регистрации электронов.

два волокна через отверстия, просверленные в разъеме по диагонали пиксела. В реальном детекторе волокна должны быть вклеены в разъем. Для проведения измерений концы волокон отдельно полировались и вставлялись без клея в отверстия разъема, установленного на ф.э.у. без использования оптической замазки. Два волокна от одной ячейки подсоединялись к одному пикселу. Прецизионное позиционирование разъема относительно входного окна ф.э.у. осуществлялось с помощью специальных меток, нанесенных на входное окно ф.э.у. фирмой-изготовителем. Достигнутая при этом точность оценивается в ~ 0.2 мм, поэтому возможно, что часть измеренной во время экспериментов утечки света из конца волокна по входному окну ф.э.у. в соседние пиксели была обусловлена несовершенством позиционирования разъема. В окончательной конструкции разъема была достигнута точность 50 мкм.

Тестовая установка и экспериментальная программа

Прототипы модулей с.я.д. и п.д. были изучены на пучке X7 (CERN) совместно с прототипами электромагнитного (э.к.) и адронного (а.к.) калориметров. Модуль из сцинтиллятора на основе полистирола толщиной 15 мм располагался первым по пучку. За ним была установлена свинцовая пластина толщиной 10 мм, а далее — модуль из сцинтиллятора BC-408 толщиной 10 мм. Прото-

тип э.к. представлял собой сборку из 3×3 модулей типа “шашлык” [1, 2]. Расстояние между модулем предливневого детектора и э.к. составляло 10 см. Прототип а.к. состоял из модуля TileCal [1, 2] и располагался на расстоянии 60 см за э.к. Все прототипы были размещены на подвижной платформе, обеспечивающей поперечное сканирование с точностью 1 мм по горизонтали и вертикали. Пучковый канал позволял выбирать тип частиц: электроны, мюоны и π -мезоны — и изменять их импульс в интервале 10–100 ГэВ/с, что давало возможность изучать энергетическое разрешение и разделение электронов и π -мезонов с точностью лучше процента. Для выделения электронов и π -мезонов в триггере использовались два пороговых черенковских счетчика. Для подавления примеси мюонов в пучке за а.к. располагался вето-счетчик, отсекавший прошедшие заряженные частицы.

Экспериментальные результаты с модулями с.я.д. и п.д.

Разделение заряженных π -мезонов и электронов.

Электроны высокой энергии, взаимодействуя в слое свинца — конвертора, дают начало электромагнитному ливню, который приводит к появлению значительного сигнала в следующем за свинцовым слоем сцинтилляторе п.д. Вероятность для π -мезонов дать начало адронному ливню в свинце толщиной 1 см составляет $\sim 10\%$. На пороговом разделении сигналов в п.д. и построен принцип разделения π -мезонов и электронов. На рис. 6 показаны распределения сигналов от электронов и π -мезонов с энергиями 50 ГэВ в п.д. Согласно полученным данным, доля π -мезонов, дающих сигнал выше порога регистрации, соответствующего 95%-ной эффективности регистрации электронов, составляет 7.5, 7 и 8% для энергий пучка 10, 20 и 50 ГэВ соответственно. Использование информации об энергии частиц пучка и энерговыделении в э.к. позволяет обеспечить дополнительное подавление π -мезонов, как это показано на рис. 7. В приведенном случае пороги регистрации применяются и в п.д., и в э.к. При этом 12 из 3094 событий, соответствующих π -мезонам, попадают в область выделения электронов и дают сигналы в адронном калориметре и с.я.д., неотличимые от электронов. Доля π -мезонов, дающих сигнал в п.д. и в э.к. выше порогов регистрации, соответствующих 91, 92 и 97%-ной эффективности регистрации электронов, составила 0.4, 0.4 и 0.3% для энергий пучка 10, 20 и 50 ГэВ соответственно. В случае работы на пучке частиц с известным импульсом размер области выделения электронов в э.к. и, следовательно, уровень подавления π -мезонов определяется энергетическим разрешением э.к. В реальном эксперименте нужно также учесть точность определения им-

пульса частицы и случайное наложение сигналов от других частиц, попадающих в анализируемые ячейки, что приведет к ухудшению подавления π -мезонов.

Возможность дополнительного подавления π -мезонов с помощью с.я.д. была изучена в тестовых испытаниях с использованием внутренней матрицы 3×3 из ячеек размером 40×40 мм с пучком, проходящим через центральную ячейку. Неупругое взаимодействие π -мезона высокой энергии с ядром свинца может сопровождаться испусканием ядром медленных нуклонов, дающих дополнительный сигнал в с.я.д. Это может быть использовано для усиления подавления π -мезонов дополнительно к пороговому подавлению в п.д. Сравнительный анализ сигналов в п.д. и с.я.д. показал, что размер кластера, равный количеству сработавших ячеек, примыкающих к анализируемому треку, может различаться для π -мезонов и электронов одной энергии. Так, например, для 7% π -мезонов с энергией 20 ГэВ, превысивших 94%-ный порог регистрации электронов в п.д. (~7 м.и.ч.), размер кластера распределен практически равномерно от 1 до 7 ячеек, а для 35% π -мезонов — составляет больше 5 ячеек, тогда как для электронов, преодолевших тот же самый порог в п.д., размер кластера меньше или равен 5 ячейкам в 95% случаев. Сумма сигналов в с.я.д. также может быть использована для дополнительного подавления π -мезонов. Так, введение дополнительного порога по сумме сигналов в с.я.д., равного 8 м.и.ч., уменьшает долю π -мезонов с энергией 20 ГэВ, превысивших 94%-ный порог регистрации электронов в п.д., с 7 до 4.5%. Тем не менее, эффект от применения дополнительного порога по сумме сигналов или по размеру кластера в с.я.д. в условиях большой плотности треков реального эксперимента на адронном коллайдере требует отдельного изучения.

Энергетическое разрешение электромагнитного калориметра. Наличие свинцового конвертора перед э.к. приводит к тому, что в нем поглощается часть энергии электромагнитного ливня, что должно ухудшить энергетическое разрешение э.к. Так как энергия, выделяемая ливнем в свинце, зависит от числа образовавшихся в нем частиц, то сигнал, генерируемый выходящими из свинца частицами ливня в п.д., может быть использован для коррекции энергетического разрешения э.к. Моделирование методом Монте-Карло [8] показывает, что потери в свинце толщиной 1 см составляют незначительную часть электромагнитного ливня, в особенности для используемых энергий пучка 10–50 ГэВ. Поэтому коррекция для экспериментальных данных ожидается минимальной. Это подтверждается полученными данными. Например, разрешение в э.к. на электронах с энергией 20 ГэВ без коррекции потерь в свинце составило $\sigma_E/E = 2.5\%$, а с коррекцией — $\sigma_{E_{corr}}/E_{corr} =$

Сигнал в п.д., отсчеты а.ц.п.

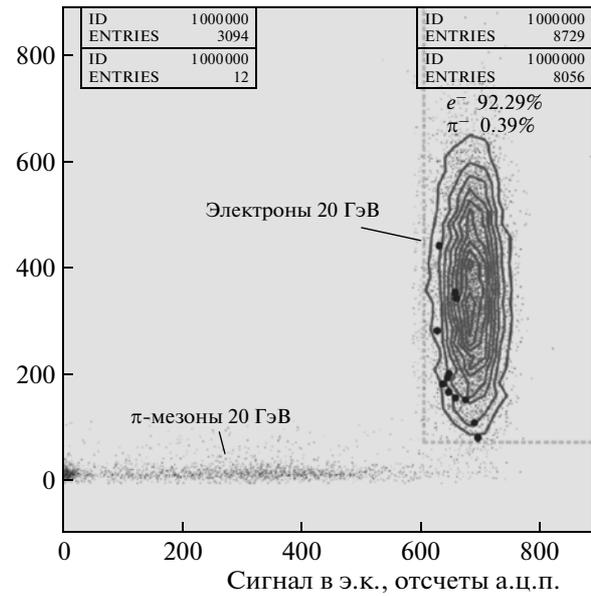


Рис. 7. Распределение сигналов в отсчетах а.ц.п. для электронов и π -мезонов с энергиями 20 ГэВ в п.д. и э.к. Штриховой линией выделена область, внутри которой расположены 8056 из 8729 (92.3%) событий с электронами и 12 из 3094 (0.4%) событий с π -мезонами. События с π -мезонами, попавшие в область выделения электронов, показаны жирными точками, а распределение электронов — маленькими точками и контурными линиями.

$= 2.3\%$. Применялась линейная коррекция $E_{corr} = E_{э.к.} + \alpha E_{п.д.}$, где коэффициент α получен минимизацией энергетического разрешения на конкретном наборе данных. Эффективность примененной коррекции подтверждается при ее сравнении с разрешением в э.к. для случая малых сигналов в п.д. — $\sigma_E/E = 2.35\%$.

Регистрация заряженных частиц в с.я.д. Световых выходов ячеек с.я.д. от пучковых частиц оценивался сравнением с сигналом от светодиода с той же амплитудой. Калибровка отсчетов а.ц.п. в единицах фотоэлектронов осуществлялась обычным методом по относительной ширине распределения сигналов от светодиода. Согласно оценке, количество фотоэлектронов от м.и.ч. (наиболее вероятное значение) составило 20 ф.э. для ячейки 120×120 мм и 30 ф.э. для ячейки 40×40 мм. Эффективность регистрации частиц с порогом 0.5 м.и.ч. составила ~98%. Для того чтобы сравнить результаты с измеренными значениями световых выходов отдельных прототипов ячеек, описанных выше, необходимо учесть следующие дополнительные потери света, возникающие в конструкции модулей детектора.

- Потери света в оптическом разъеме между с.с.в. и прозрачным волокном, оцениваемые как $\sim 0.87 \pm 0.03$. Поскольку в исследуемой конструк-

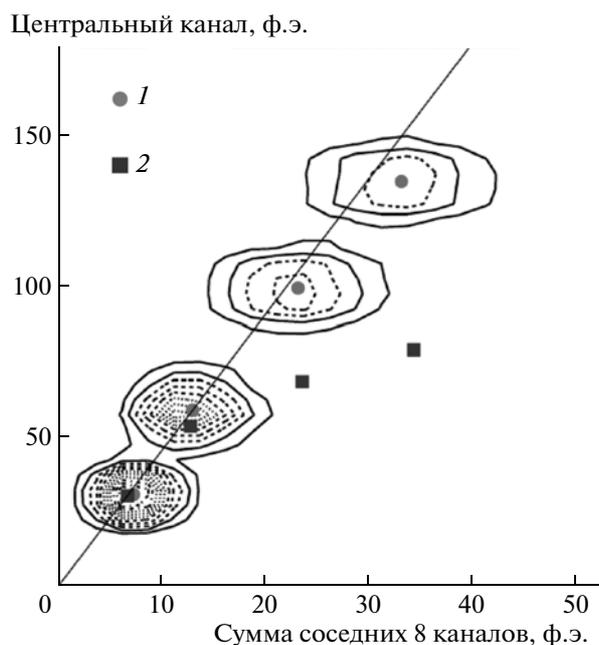


Рис. 8. Зависимость суммы сигналов, обусловленных утечкой света, в 8 соседних каналах ф.э.у. от сигнала от светодиода в центральном пикселе, полученная для четырех значений амплитуды: 1 – центральные значения распределений амплитуд соответствуют оценке количества света в ф.э., полученной по ширине распределений на малых амплитудах сигналов (см. текст); 2 – оценка числа ф.э. по ширине распределений для каждой амплитуды отдельно. Видна заметная нелинейность сигналов в центральном канале для амплитуд больше 50 ф.э.

ции модулей были использованы индивидуальные разъемы для каждой отдельной пары волокон, а в реальном детекторе планируется применение разъемов для группы из 32 волокон, то специальной оптимизации оптического контакта для тестов не проводилось.

- Около 20% света утекало в месте оптического контакта с входным стеклом многоанодного ф.э.у. из торца волокна в соседние каналы ф.э.у. Возможности для снижения этих утечек обсуждаются ниже.

- Отношение эффективностей фотокатода ФЭУ-85, применявшегося в измерениях с отдельными ячейками, и многоанодного ф.э.у. R5900 составило по результатам измерений 1.3 ± 0.05 для длины волны 500 нм.

- В прозрачном волокне длиной 3 м фактор потерь света составил 0.71. Для испытаний с отдельными ячейками прозрачное волокно не использовалось.

- Неоднородность светосбора в ф.э.у. R5900 в отдельном канале составила $\sim 12\%$ (r.m.s.), что привело к снижению оценки эффективного числа ф.э.

Суммарный коэффициент оцененных потерь составил 0.37 ± 0.05 без учета дополнительных потерь света $\sim 10\%$ в месте контакта волокна и ф.э.у. в испытаниях с модулями без применения оптической смазки.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОАНОДНОГО Ф.Э.У.

При выборе фотоприемника для предливневого детектора мы ориентировались на такие характеристики многоанодного ф.э.у., как быстрое время отклика, большой коэффициент усиления, нечувствительность к магнитному полю, компактный дизайн и относительно невысокая стоимость канала. Среди недостатков, усугубляющихся с ростом числа анодов, можно отметить небольшой диапазон линейности усиления сигнала, значительный разброс коэффициентов усиления между анодами, что также ограничивает динамический диапазон, и заметную оптическую связь между соседними каналами ф.э.у. Во время испытаний прототипов модулей п.д. и с.я.д. использовался 64-анодный ф.э.у. H7546 серии R5900-00-64 с рекомендованным производителем относительным распределением высокого напряжения между 12 диодами: 3–2–2–1...1–2–5. Неоднородность коэффициентов усиления между анодами составила ~ 2 (max/min).

Оптическая связь между соседними каналами ф.э.у.

64 канала (пиксела) ф.э.у. расположены в виде матрицы 8×8 . Свет, покидающий волокно через торец под углом, может проходить через стекло входного окна ф.э.у. до соседнего канала. Величина этой утечки определяется точностью позиционирования волокна и пиксела ф.э.у., расстоянием от торца волокна до окна ф.э.у. и толщиной стекла. Оптический разъем из непрозрачного пластика, применявшийся в испытаниях, обеспечивал позиционирование волокон с помощью индивидуальных отверстий $\varnothing 1.05$ мм таким образом, что пара волокон от отдельной ячейки располагалась по диагонали одного пиксела ф.э.у. Размер площади пиксела равен 2×2 мм. Расстояние от края волокна до границы пиксела ~ 0.1 мм. Оптическая связь между пикселями измерялась с помощью светодиода, облучавшего одно из двух волокон, приходящих к центральному пикселу из 3×3 . Сигналы при этом измерялись во всех 9 пикселях.

Распределения сигналов разных амплитуд от светодиода в центральном пикселе относительно суммы сигналов в соседних 8 пикселях показаны на рис. 8. Суммарная величина измеренной утечки света в соседние 8 пикселей составила $\sim 20\%$. При этом около 80% утечки приходится на пиксели, примыкающие к центральному по сторонам в виде креста, а остальные 20% распределены между угловыми пикселями. В более отдаленные пик-

сены свет практически не доходит. Фотостатистические флуктуации между центральным и соседними пикселями не имеют видимой корреляции. Это подтверждает предположение, что утечка сигнала происходит до начала процесса усиления на первом диноде ф.э.у. Также нужно отметить, что величина утечки не зависит от величины сигнала в случае малых сигналов. В случае больших сигналов (>50 ф.э.) требуют учета эффекты, связанные с насыщением усиления.

Следует отметить, что наблюдаемая величина оптической связи между пикселями достаточно значима, чтобы ею можно было пренебречь. Часть этих утечек возникает из-за неточности позиционирования и может быть исправлена. Также следует избегать воздушных зазоров между волокнами и стеклом ф.э.у. Для уменьшения влияния неизбежной оптической связи между соседними пикселями на реконструкцию физических процессов в реальном детекторе применена схема подсоединения ячеек детектора к пикселям ф.э.у., исключая возможность подсоединения соседних ячеек к соседним пикселям.

Диапазон линейности ф.э.у.

Оценку линейности усиления ф.э.у. можно выполнить с использованием тех же данных со светодиодами, что и в случае изучения оптической связи. Например, может быть использована зависимость суммы сигналов, обусловленных утечкой света в 8 соседних каналах ф.э.у., от сигнала в центральном пикселе, полученная для нескольких значений амплитуды светодиода, как показано на рис. 8. Центральные значения распределений амплитуд (точки 1) показывают оценки количества света в ф.э., полученные калибровкой шкалы а.ц.п. на малых амплитудах сигналов с использованием формулы $N_{ф.э.} = (A/\sigma_A)^2$, где A и σ_A – среднее и стандартное отклонения распределения амплитуды. Число ф.э. (точки 2) оценивалось по ширине распределений для каждой амплитуды отдельно. Можно видеть заметную нелинейность для сигналов в центральном канале при амплитудах >50 ф.э. Измерения выполнялись при напряжении на ф.э.у. 850 В, что соответствует усилению $\sim 10^6$. Сопротивление нагрузки равнялось 50 Ом. Время нарастания сигнала от светодиода до максимального значения составляло ~ 30 нс при полной длительности ~ 80 нс по основанию (10%-ный уровень). Время интегрирования заряда в а.ц.п.

150 нс. Принимая во внимание, что сигналы от частиц быстрее, чем от светодиодов, эффекты насыщения усиления должны быть более заметны на физических данных. Одна из возможностей увеличения линейности ф.э.у. – уменьшение коэффициента усиления за счет снижения рабочего напряжения. Для компенсации можно увеличить соответственно величину сопротивления нагрузки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования прототипов сцинтилляционных ячеек и прототипов модулей сцинтилляционно-ячеистого и предливневого детекторов LHCb. По результатам измерений световых выходов и его однородности выбраны компоненты и оптимальная конструкция ячеек прототипов. Исследования энергетического разрешения и идентификации π -мезонов и электронов для прототипов калориметрической системы показали, что конструкция модулей удовлетворяет требованиям эксперимента LHCb.

Авторы считают своим приятным долгом выразить признательность за помощь при проведении измерений своим коллегам по калориметрической группе и, особенно, поблагодарить за внимание и поддержку данной работы В.А. Матвеева и за помощь в организации работ Л.В. Кравчука.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The LHCb Collaboration // LHCb Technical Proposal. CERN/LHCC 98-4. 1998.
2. The LHCb Collaboration // JINST. 2008. V. 3. P. S08005.
3. Kryshkin V.I., Ronzhin A.T. // Nucl. Instrum. and Methods. 1986. V. A247. P. 583; The CDF II Collaboration // CDF II Detector TDR. FERMILAB-Pub-96/390-E. 1996; Aguilion G., Anderson B., Attree D.J. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 1998. V. A417. P. 266; Aggarwal M.M., Agnihotri A., Ahammed Z. et al. // hep-ex/9807026. 1998.
4. HAMAMATSU Photonics KK. Electron Tube Center. 314-5. Shimokanzo. Toyoka-village. Iwata-gun. Shizuoka-ken. 438-01. Japan.
5. BICRON Corp. 12345 Kinsman Rd. Newbury OH 440 USA.
6. KURARAY Corp. 3–10. Nihonbashi. 2 chome. Chuo-ku, Tokyo, Japan.
7. Hara K., Hata K., Kim S. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 1998. V. A411. P. 31.
8. Gushchin E., Laptev S. LHCb 2000-30 CALO. 2000.