

P13-2005-27

А. М. Артиков¹, Ю. А. Будагов, Б. В. Гринев²,
В. И. Данилов, В. Н. Лебедев², В. Г. Сенчишин²,
Д. Ш. Чохели³

**PRESHOWER — НОВЫЙ МНОГОКАНАЛЬНЫЙ
ДЕТЕКТОР ДЛЯ CDF**

Сцинтилляционные пластины нового детектора:
разработка, производство, контроль качества

¹ ЯФЛ Самаркандского государственного университета, Узбекистан

² НИО ЩГК НТК «Институт монокристаллов» НАН Украины, Харьков

³ ИФВЭ Тбилисского государственного университета, Грузия

Артиков А. М. и др. P13-2005-27
PRESHOWER – новый многоканальный детектор для CDF.
Сцинтилляционные пластины нового детектора: разработка,
производство, контроль качества

С целью повышения эффективности установки CDF в исследованиях процессов с тяжелыми кварками создан и введен в действие новый многоканальный детектор, т.н. Central Preshower (CPR2). Размещенный перед центральным электромагнитным калориметром, он улучшил точности измерения углов и импульсов частиц в электромагнитном калориметре и повысил эффективность идентификации фотонов, лептонов и адронов.

ОИЯИ в кооперации с НИО ЩГК НТК «Институт монокристаллов» НАН Украины (Харьков) создал чувствительный элемент нового детектора: более 2800 сцинтилляционных пластин — тайлов. Разработанная методика контроля обеспечила отбор тайлов с необходимым высоким световыходом. Отобранные тайлы, оснащенные во FNAL двумя витками (~ 1 м) WLS-оптоволоконка в Ω -образной канавке, обеспечили световыход ~ 25 –35 фотоэлектронов/MIP.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2005

Artikov A. M. et al. P13-2005-27
The PRESHOWER – a New Multichannel Detector for the CDF.
The Scintillator Plates of the New Detector: Design, Production, Quality Control

To increase the CDF efficiency when studying heavy quark processes there was designed, constructed and put into operation a new multichannel detector — the so called Central Preshower. It was positioned before the central electromagnetic calorimeter and increased the photon, lepton and hadron identification efficiency.

JINR in cooperation with the Institute of Scintillating Materials (Kharkiv) has created a sensitive element of the new detector: about 2800 units of the scintillation tiles; the specially developed quality control procedure guaranteed the necessary high light yield for tiles mass production. The chosen tiles were equipped at FNAL by two loops (about 1 m long) of WLS fibers positioned inside the Ω -shape groove; it guaranteed a light yield of ~ 25 –35 photoelectrons/MIP.

The investigation has been performed at the Dzhelapov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2005

ВВЕДЕНИЕ

Исследовательская программа CDF на тэватроне FNAL включает ряд существенных проверок современной теории и поиск явлений за ее пределами. Растущая светимость тэватрона (сегодня это почти $10^{32}/\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$) дала уникальную возможность для проведения на CDF экспериментов по физике с-, b-, t-кварков, поиску хиггс-бозонов, проявлений существования SUSY-частиц и т. д. Выполнение этих исследований потребовало существенной модернизации CDF, и ОИЯИ с НИО ЩГК НТК «Институт монокристаллов» НАН Украины уже внесли крупный вклад на ряде ключевых этапов программы «CDF Upgrade» [1]. В рамках этой программы на CDF в конце 2004 г. был установлен новый детектор – Central Preshower (CPR2).

Детектор CPR2 создан для замены предыдущей устаревшей версии детектора CPR.

Детектор CPR (рис. 1) установки CDF в RUN 1 в основном использовался для достоверной идентификации электронов. Он позволил увеличить в 2–3 раза подавление фона от заряженных пионов, что крайне важно при последующей идентификации электрона для B-jet-мечения. Использование

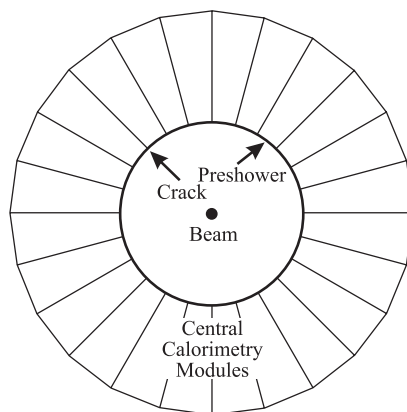


Рис. 1. Схема расположения детектора Central Preshower (CPR) на CDF

CPR-детектора повысило эффективность идентификации одиночных фотонов (на фоне мезонов) в области энергий больше 35 ГэВ. Детектор также улуч-

шал энергетическое разрешение струй, что очень существенно для поиска или экспериментального сужения вероятного интервала масс частиц Хиггса [2].

Необходимость модернизации действовавшего в RUN 1 CPR-детектора обусловлена следующими причинами [2]:

- в RUN 1 Central Preshower базировался на относительно медленных проволочных газовых детекторах — пропорциональных камерах. С увеличением светимости до планируемой $2 \cdot 10^{32}/\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ и интервалом между банчами в 132 нс такие детекторы работают с трудом или вообще перестают справляться со своей задачей;

- амплитуда импульса сильно уменьшилась из-за деградации сигнальной проволочки;

- необходимость улучшения энергетического разрешения требовала увеличения сегментации по η , в новом детекторе она возросла почти на порядок.

Для решения возникших проблем было решено использовать более быстрые сцинтилляционные детекторы [2].

1. ОПИСАНИЕ МНОГОКАНАЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА CPR2

Новый детектор CPR2 был установлен на CDF (FNAL) в течение длительной остановки тэватрона с конца августа до середины ноября 2004 г. [3]. Детектор сегментирован по полярным координатам и собран из сцинтилляционных пластин (далее именуемых тайлами, рис. 2) с размерами $125 \times 125 \times 20$ мм.

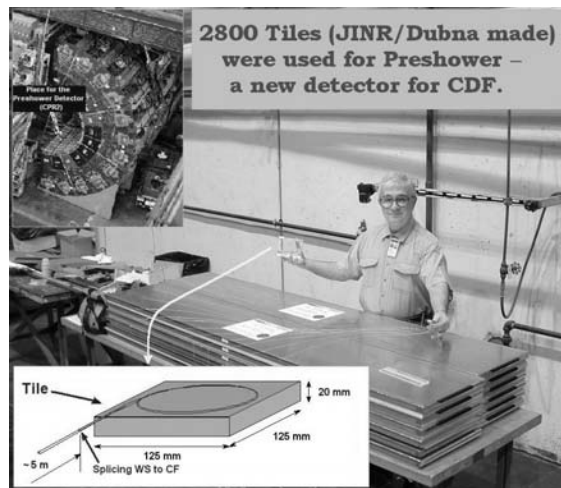


Рис. 2. Сцинтилляционная пластина (тайл), модули (54 тайла в каждом) и расположение (48 шт.) модулей на CDF

Светосбор с отдельно взятого тайла осуществляется с помощью спектросмещающего (WLS) оптоволокну, размещенного в специальной (Ω -образной) канавке на поверхности тайла [4].

Шесть таких тайлов, расположенных в два ряда по три штуки в каждом, полностью покрывают (рис. 3) ближнюю к оси пучка поверхность од-

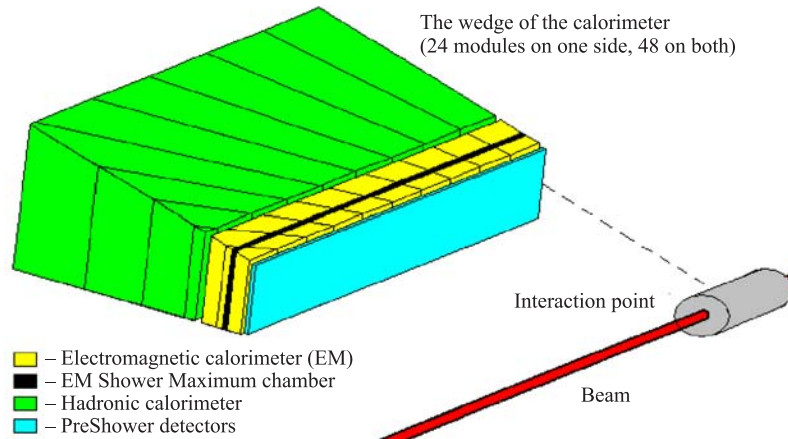


Рис. 3. Модуль нового детектора Central Preshower (CPR2) и его расположение на CDF

ной башни центрального калориметра [5]. Детектор собран из модулей, в каждом из которых расположено 54 тайла (рис. 4). Всего создано и установлено 48 таких модулей по числу клиньев центрального калориметра (рис. 2).

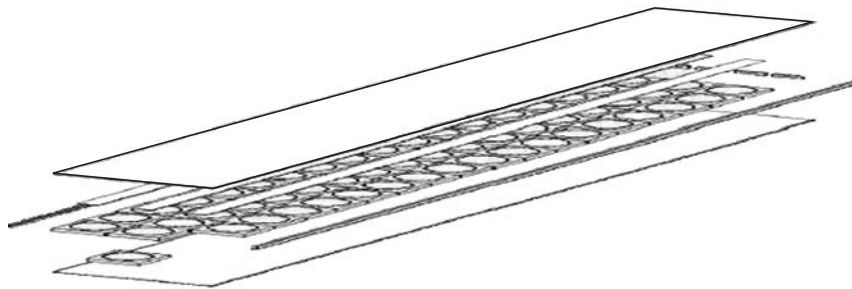


Рис. 4. Схема расположения тайлов в модуле

Посредством оптических волокон свет с тайлов транспортируется на специальный оптический разъем, откуда дальше через специальный оптоволоконный кабель свет доставляется на 16-канальный ФЭУ Hamamatsu R5900-16 [6].

2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПРОТОТИПОВ ТАЙЛОВ

Нами был выполнен большой объем научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок (НИОКР), в результате которых в ОИЯИ созданы технологии нарезки тайлов из больших пластин и последующей обработки граней тайлов. Подтверждена правильность выбранного нашими коллегами по коллаборации CDF оптимального варианта сечения канавки для WLS-оптоволокну и его расположения на поверхности тайла. Наши наработки реализованы в числе прочих во FNAL, ANL и INFN при заключительной подготовке тайлов, оснащенных оптическими волокнами, к установке в модули.

Учитывая важность этапа НИОКР, нами были отправлены две пластины размерами $1800 \times 450 \times 20$ мм в INFN и во FNAL для дублирующих предварительных работ по исследованию их свойств [7]. Кроме того, для отладки процесса резки и обработки образовавшихся при этом граней мы использовали несколько сцинтилляционных пластин такого же размера, но невысокого качества (т. н. «желтые»). В итоге были выработаны строгие технологические рекомендации по фиксации в опытном производстве (ОП) ОИЯИ оптималь-

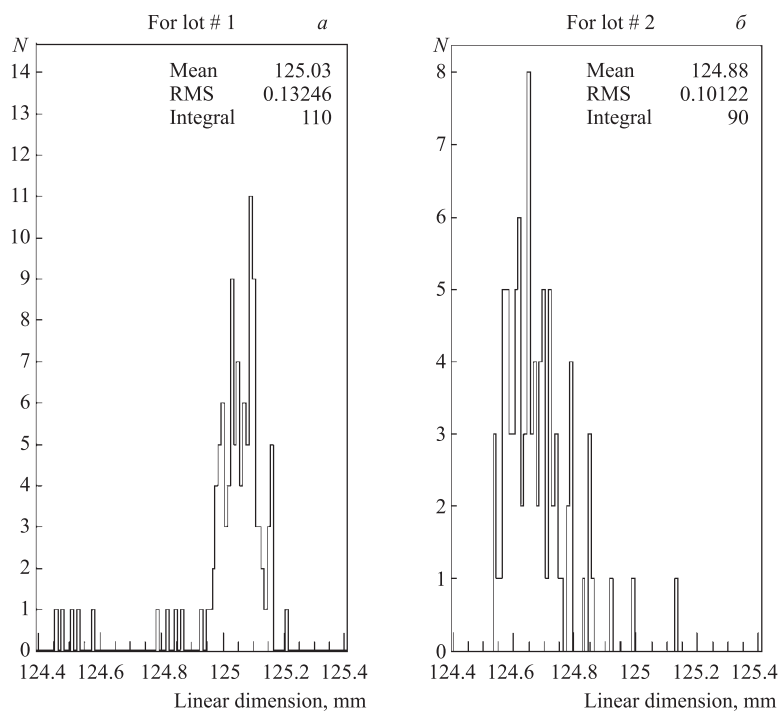


Рис. 5. Размеры тайлов до (а) и после (б) коррекции допусков на резку и обработку

ного режима резки и последующей обработки граней: фрезерование, чистовая шлифовка. Это позволило нам нарезать опытную партию тайлов в количестве 100 штук двумя сериями (55 и 45 штук) для проверки соответствия линейных размеров, заданных в допусках на чертежах. Измерения производились с помощью цифрового микрометра Mitutoyo HDS-G30. По результатам проверки первой партии (55 шт.) были скорректированы допуски на обработку нарезанных тайлов. Измерения размеров второй контрольной партии (45 шт.) полностью подтвердили правильность выбранных параметров резки и обработки (рис. 5). Далее эти тайлы были отправлены во FNAL и INFN для дублирования контрольных исследований и окончательного выбора оптимальной конфигурации канавки для оптоволокну. Этап НИОКР в ОИЯИ, FNAL, ANL и INFN позволил начать массовое производство тайлов [8].

Следует отметить, что на этапе НИОКР проведены сравнительные исследования тайлов разных сцинтилляционных пластин; при этом сравнивались сцинтилляционные пластины от MINOS, ОИЯИ, ITER Group, BICRON. ОИЯИ представлял сцинтилляционные пластины на основе UPS923D производства НИО ЦГК НТК «Институт монокристаллов» НАН Украины, Харьков. По полученным результатам был выбран UPS923D как наилучший по совокупности качеств: световыход и цена (рис. 6).

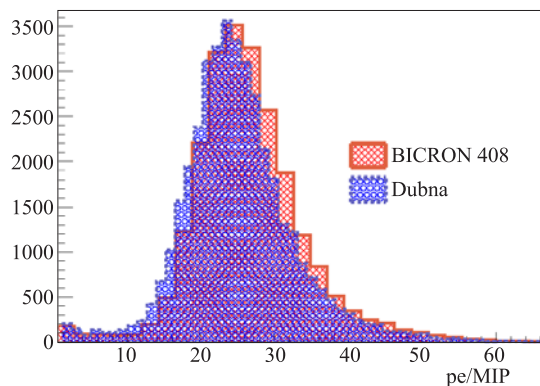


Рис. 6. Световыход тайлов «Bicron 408» и «Дубна» (с четырьмя витками незазеркаленного WLS PolHiTech оптоволокну, уложенного в прямоугольную канавку глубиной 6 мм) отличается не более чем на 5%

3. МАССОВОЕ ПРОИЗВОДСТВО ТАЙЛОВ

Сложность работ определялась чрезвычайно жесткими временными ограничениями: менее чем за три месяца требовалось изготовить и отправить во

FNAL более 2800 сцинтиляционных тайлов. Для решения этой задачи мы начали изготовление тайлов в ОИЯИ с одновременным использованием производственных мощностей «Института монокристаллов».

Как описано выше, на стадии НИОКР мы наладили в ОП ОИЯИ оптимальный режим нарезания тайлов, а также обработку их граней. Полировка граней 100 тайлов опытной партии производилась нами в ЛЯП ОИЯИ на полировочном круге. «Ручная» полировка занимала много времени и для обеспечения требуемого качества и необходимого темпа производства готовых тайлов более 40 штук в день потребовалось бы значительное количество человеко-часов. Это недопустимо удлиняло бы и удорожало производство. Поэтому нами для оптимизации процесса полировки было спроектировано и создано специальное устройство — зажим-фиксатор, позволяющее полировать грани 20 тайлов одновременно (рис. 7).

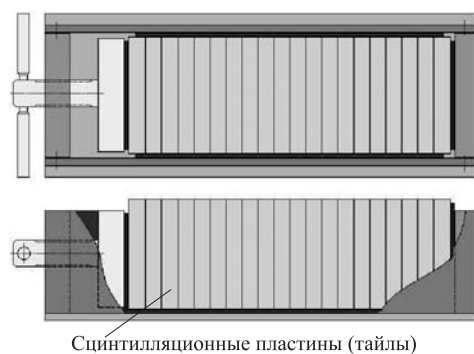


Рис. 7. Устройство зажима-фиксатора

Полировка производилась в два этапа. Сначала, используя зажим-фиксатор, полировали одновременно 20 тайлов. После окончания основной процедуры при необходимости на полировочном круге (очень быстро!) производилась «дополировка» отдельных граней.

Перед полировкой тайлов в зажимном устройстве мы формировали из граней тайлов ровную плоскую поверхность. В качестве формирователя плоской поверхности использовался специально обработанный для этой цели алюминиевый брусок размерами 800×140×60 мм. В зажиме-фиксаторе располагали необходимое (до 20 штук) количество тайлов. Затем зажим-фиксатор переворачивали «вверх дном» на «эталонную» поверхность алюминиевого бруска и формировали из граней тайлов плоскую поверхность, после чего тайлы фиксировались со стороны трех необрабатываемых граней.

Полировка сформированной из обрабатываемых граней тайлов плоской поверхности производилась с помощью модифицированной нами (коммерчески доступной) эксцентричной шлифовальной машины ЭШМ-5. Была обес-

печена непрерывная подача полировочной суспензии (водный раствор полировочного порошка «полироль») в активную зону. В качестве полировочного материала использовался войлок. Опыт показал, что на полировку поверхности, составленной из граней 20 тайлов, требовалось не более 20–30 мин.

После основной процедуры при необходимости производили «дополировку» отдельных (обычно 3–5) граней на полировочном круге. Следует отметить, что в этом случае время, затрачиваемое на «дополировку» каждой грани тайла, составляло менее двух минут. Это существенно меньше, чем если бы полировка производилась полностью на полировочном круге без применения зажима-фиксатора. В целом применение зажима-фиксатора ускорило процесс полировки узких граней тайлов более чем в два раза.

Почти 2/3 от общего количества тайлов было произведено в Харькове с присущим «Институту монокристаллов» строгим соблюдением заданных размеров и высоким качеством продукции. Нашей основной задачей в этом случае было налаживание процесса контроля качества производимых тайлов.

4. МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ТАЙЛОВ

Главной нашей задачей была своевременная (до остановки тэватрона) поставка более чем 2800 сцинтилляционных тайлов хорошего качества. Учитывая, что свет от тайла транспортируется на значительное (до 5 м) расстояние, прежде чем достигнет ФЭУ, разработчиками детектора было поставлено довольно высокое требование — световыход от минимально ионизирующей частицы (MIP) с WLS-оптоволокну, установленного в Ω -образной канавке на поверхности тайла, должен был составить не менее 18 фотоэлектронов (ФЭ).

Так как изготовление канавки для WLS-оптоволокну происходило перед последним этапом — сборкой модуля CPR2 в США, то нашей непосредственной задачей являлось определение световыхода с тайла без канавки, соответствующего вышеуказанному условию, — 18 ФЭ/MIP, с WLS-оптоволокну, установленного в канавку. Мы провели серию контрольных измерений с целью решения этой задачи.

Суть методики состояла в следующем. Вначале измерялся световыход (в ФЭ) с проектируемым методом съема света при помощи WLS-оптоволокну и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). На втором этапе ФЭУ был представлен непосредственно к одному из узких торцов тайла и таким образом определялся световыход (в ФЭ) с исследуемой пластины. Для проведения исследований нами было изготовлено несколько прототипов тайлов из сцинтилляционных пластин разного качества.

Кроме этого, использовался радиоактивный источник, излучение которого коллимировалось в пучок диаметром 1 мм. Облучение производилось

перпендикулярно большой поверхности тайла на фиксированных расстояниях от ФЭУ, приставленного к узкой грани пластины, и измерялся анодный ток. Этот метод традиционно используется в «Институте монокристаллов» для определения параметров производимых сцинтилляционных пластин. Мы провели исследования с целью согласования оценок световых выходов, измеренных с использованием радиоактивного источника и методом абсолютной калибровки [9], с целью выработки опорного параметра для контроля качества тайлов, производимых в Харькове.

4.1. Измерения, проведенные во FNAL. Измерения световых выходов с WLS-оптоволокну, установленного в канавке тайла, а также из узкой грани пластины производились на собранном нами в Фермилаб стенде [10]. В первом случае тайл оборачивался светоотражающей бумагой типа «апельсиновая корка», а во втором ФЭУ плотно приставлялся к узкой грани «голой» (без светоотражающего материала) пластины. Измерения проводились в светоизолированном коробе с использованием мюонного телескопа из трех сцинтилляционных счетчиков размерами $8 \times 5 \times 1$ см, включенных в схему совпадений. Из наших результатов, приведенных на рис. 8, видно, что требуемый свето-

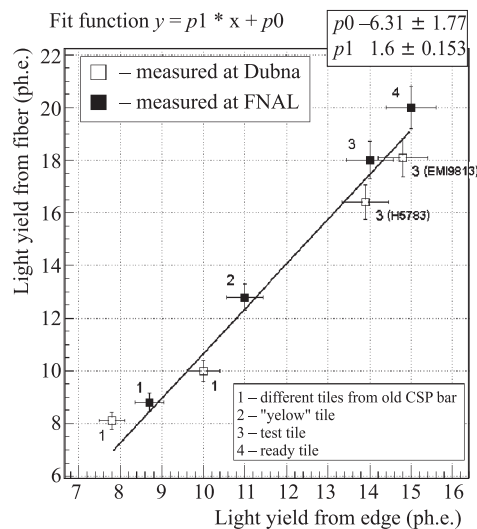


Рис. 8. Корреляция световых выходов с WLS-оптоволокну и с узкой грани тайла

выход 18 ФЭУ/МІР с WLS-оптоволокну получается из тайла, с узкой грани которого измерено не менее 14 ФЭУ/МІР.

4.2. Измерения, проведенные в ОИЯИ. Больше 1/3 общего количества тайлов было изготовлено в ОП и ЛЯП ОИЯИ. В связи с этим требовалось

проведение контрольных измерений при производстве тайлов, аналогичных тем, которые были сделаны нами во FNAL.

С этой целью в ЛЯП ОИЯИ нами разработан и создан измерительный стенд (рис. 9). Исследуемый тайл помещался в светоизолированный короб.

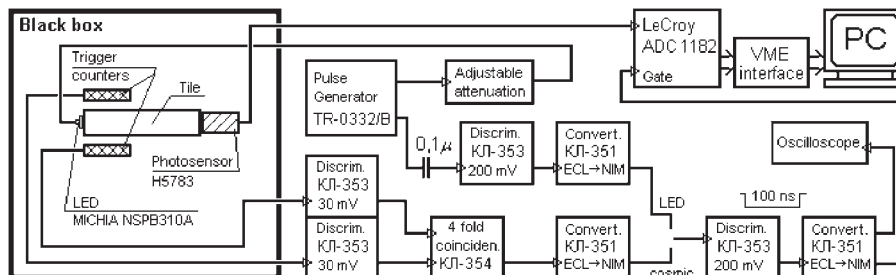


Рис. 9. Блок-схема стенда, созданного и использованного для измерений в ОИЯИ

В коробе размещались два триггерных счетчика размерами $8 \times 6 \times 2$ см, ФЭУ и светодиод для абсолютной калибровки. Исследования проводились с использованием двух разных ФЭУ: EMI-9813 (Electron Tubes Inc., США) и фотосенсор H5783 на основе ФЭУ R5600 (Hamamatsu, Япония). Фотокатод EMI-9813 закрывался черной бумагой с отверстием посередине. Диаметр этого отверстия (8 мм) равняется диаметру фотокатода ФЭУ R5600.

Исследования световых тайлов проводились с регистрацией импульсов от космических мюонов. Спектры сигналов с ФЭУ измерялись зарядово-цифровым преобразователем (ЗЦП) LeCroy ADC 1182. Важное достоинство примененного ЗЦП заключается в высокой чувствительности (~ 50 фКл/канал), что позволяло обойтись без усилителя импульсов. Длительность ворот ЗЦП составляла ~ 100 нс. В случае необходимости применялся ослабитель сигналов для увеличения динамического диапазона амплитуд измеряемых импульсов при измерении спектра от космических мюонов. Информация с ЗЦП считывалась персональным компьютером.

Установка работала в двух разных режимах. Первый режим применялся для калибровки спектрометрического канала, второй — для получения амплитудных спектров с тайла от космических мюонов.

Для калибровки спектрометрического канала триггер вырабатывался импульсным генератором, запускающим быстрый синий светодиод MICHIA NSPB310A. Среднее количество фотонов, попадающих на фотокатод ФЭУ, регулировалось изменением амплитуды импульса, питающего светодиод. Спектры от светодиода использовались для определения параметров спектрометрического канала и контроля их временного дрейфа. Для этой цели калибровочные измерения проводились до и после каждого набора статистики на мюонах.

Физический триггер вырабатывался мюонным телескопом, состоящим из двух описанных выше сцинтилляционных счетчиков, включенных в схему совпадений (СС). Исследуемая пластина располагалась между ними так, чтобы триггерные счетчики оказались на максимальном удалении от ФЭУ, приставленного к узкой грани тайла.

Полученные нами в ОИЯИ результаты по корреляции световыхода с WLS-оптоволокну и с узкой грани тайла согласуются с нашими же более ранними данными, полученными во FNAL, и представлены на рис. 8. Из рисунка видно, что для обеспечения 18–20 ФЭ с WLS-оптоволокну необходимо получить световыход 14–15 ФЭ с узкой грани тайла. Именно этот параметр являлся определяющим при производстве и отборе тайлов по качеству в ОИЯИ.

4.3. Измерения, проведенные в Харькове. Большая часть (около 2/3 от общего числа) тайлов была произведена в Харькове, где также была необходимость оперативного производственного контроля качества пластин. В связи с отсутствием возможности быстро создать стенд для измерения световыхода методом абсолютной калибровки мы воспользовались методикой, применяемой в «Институте монокристаллов» для оценки качества сцинтилляционных пластин, с последующим сравнением полученных результатов с нашими измерениями, приведенными выше.

В этой методике для определения световыхода в единицах измеряемого анодного тока ФЭУ Hamamatsu R980 ($U_{\text{анод}}=1345$ В) используется радиоактивный источник $\text{Sr}^{90}+\text{Y}^{90}$ с коллиматором, имеющим отверстие с диаметром 1 мм. Источник располагается относительно тайла так, что излучение направлено перпендикулярно большой грани пластины. Фотокаод ФЭУ приставлен к середине узкой грани «голового» (без светоотражающего материала) тайла (рис. 10). Измерения проводили в трех точках: в 6 мм от ФЭУ, в центре тайла и на максимальном удалении от ФЭУ.

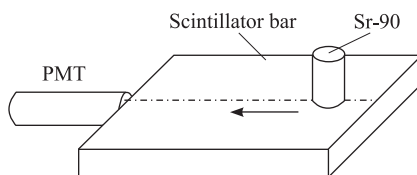


Рис. 10. Схема измерений, проведенных в НИО ЩГК НТК «Институт монокристаллов» НАН Украины (Харьков)

Как видно из рис. 11, результаты измерений в Харькове согласуются с нашими измерениями световыхода (в ФЭ) из узкой грани тайлов, проведенными в ОИЯИ. В дальнейшем при контроле качества параметр $I_a=12,5-13$ мкА являлся определяющим для отбора тайлов.

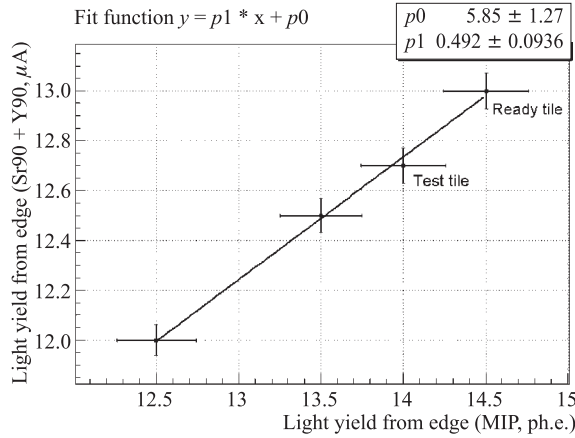


Рис. 11. Корреляция световыхода с узкой грани тайла, измеренного разными методами. Радиоактивный источник установлен в центре тайла

ВЫВОДЫ

За короткий промежуток времени нам удалось наладить производство тайлов в ОП ОИЯИ с последующей завершающей обработкой и контролем качества в НЭОМАП ЛЯП. Это позволило нам за два месяца изготовить почти 1000 тайлов со световыходом не менее 20 ФЭ/МІР на WLS-оптоволокну, установленное в Ω -образной канавке на поверхности пластины.

В такие же сжатые сроки было налажено производство и контроль качества тайлов в НИО ЩГК НТК «Институт монокристаллов» НАН Украины, где изготовили до 2000 пластин высокого качества.

Итоговые измерения во FNAL и ANL с тайлами, когда все условия для получения максимального световыхода были, в том числе и нами, предварительно оптимизированы, позволили получить до 36 и более ФЭ/МІР [3].

Достижение столь высокого световыхода с тайла обеспечило регистрацию не менее 12 фотоэлектронов после прохождения всего оптического тракта (до 5 м), что превышает более чем в два раза уровень 5 ФЭ/МІР, минимально необходимый для эффективной регистрации калориметром одиночной частицы [4]. Полученный результат — средний световыход всех тайлов, собранных в модули и установленных на CDF в составе детектора CPR2. В заключение приводим рис. 12, иллюстрирующий распределение по световыходу созданных в Харькове и Дубне тайлов детектора CPR2 после сканирования радиоактивным источником модулей, установленных на CDF. Небольшой разброс (RMS \sim 18%) является показателем качественного исполнения всего опти-

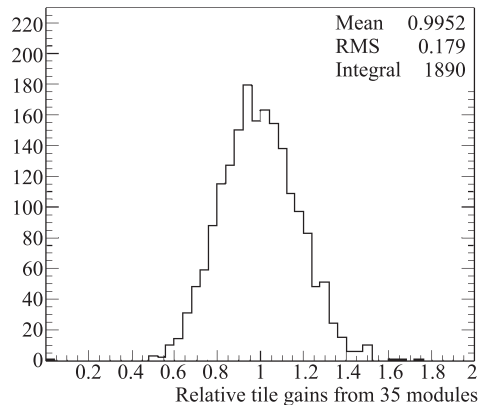


Рис. 12. Распределение тайлов CPR2 по относительному световыходу при облучении радиоактивным источником

ческого и электронного тракта, включающего тайлы, изготовленные в ОИЯИ и Харькове, WLS-оптоволокну, чистое оптоволокну без примесей, оптоволоконные кабели, половина которых изготовлена нами в Мичиганском университете, ФЭУ и ЗЦП.

Новый 2592-канальный Central Preshower установлен на CDF и используется при наборе статистики в Run 2 на тэватроне.

Огромный вклад в решение множества сложных технических проблем внес Николай Петрович Мошков. Он участвовал в проектировании и создании зажима-фиксатора. Модернизация эксцентричной шлифовальной машины ЭШМ-5 также является его заслугой.

Авторы благодарны коллегам Д. Беллеттини (FNAL), С. Кульманну (ANL) и Н. Турини (INFN) за полезные обсуждения и ценные советы.

Мы благодарны В. К. Ефимову и В. И. Коломойцу за ценные советы и помощь на стадии НИОКР. Авторы признательны С. М. Колмоец за подготовку и оформление многочисленной технической документации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Artikov A., Bellettini G., Budagov J. et al.* Design and construction of new central and forward muon counters for CDF II. // NIM A. 2005. V. 538. P. 358–371.
2. *Blair R. et al.* Proposal to Replace the Central Preshower Detector and Central Crack Chambers with an Integrated Scintillator Detector (CPR2). // CDF Note 5519, Version 3.0. July 18, 2001.

3. *Huston J. et al.* Proposal to install the new CPR2 inside the B0 collision hall. // CDF Note 6653, September 16, 2003.
4. *Goulianos K., Lami S.* A ball-shaped groove for the CPR2 tiles. // CDF Note 6785, December 22, 2003.
5. *Gallinaro M. et al.* A new scintillator tile / fiber preshower detector for the CDF central calorimeter // Fermilab-CONF-04-325-E, Nov. 2004. P. 5. Presented at 2004 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS / MIC). Pome, Italy, 16–22 Oct. 2004. e-Print Archive: physics/0411056.
6. *Kuhlmann S. et al.* Calorimetry Upgrade — RUN 2b Director's Review. July 2004, www.x1.gov
7. *Lami S. et al.* Preliminary Test of Scintillator Tiles for the CPR2 Detector. CDF Note 6228. January 17, 2003.
8. *Lmi S., Ma Y.* Test of the CPR2 tile/fiber system. CDF Note 6678. December 12, 2003.
9. *Chirikov-Zorin I. et al.* Method for precise analysis of the metal package photomultiplier single photoelectron spectra // NIM A. 2001. V. 456. P. 310–324.
10. *Artikov A., Bellettini G., Budagov J. et al.* On the aging of the CSP and CSX counters. CDF Note 7033.

Получено 14 марта 2005 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 23.06.2005.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,81. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 315 экз. Заказ № 54930.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/