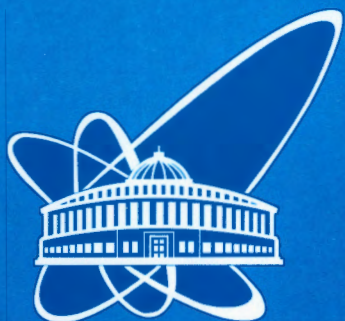


04-186



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

74086  
186-04

344.1c1  
Д13-2004-186

Н. В. Власов, О. П. Гаврищук, Н. А. Кузьмин, В. В. Кухтин,  
А. Н. Максимов, П. К. Маньяков, Ю. В. Михайлов\*,  
И. А. Савин, В. К. Семенов\*, А. Б. Шалыгин, А. И. Юкаев

24/1

КАЛОРИМЕТР ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ АДРОНОВ  
С ЭНЕРГИЯМИ 10–100 ГэВ

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

\*ГНЦ «Институт физики высоких энергий», Протвино

## ВВЕДЕНИЕ

Адронный калориметр, описанный ниже, предназначен для эксперимента NA58, ЦЕРН [1], цель которого — изучение структуры нуклонов на пучке продольно-поляризованных  $\mu^+$ -мезонов (мюонная программа) и спектроскопия очарованных частиц на пучке адронов с энергией 100–300 ГэВ (адронная программа). Мюонная программа включает изучение поляризации глюонов в нуклонах, проявляющейся в асимметрии рождения очарованных частиц  $D^0 \rightarrow K^-\pi^+$  и  $D^{*+} \rightarrow D^0\pi^+ \rightarrow (K^-\pi^+)\pi^+$  на поляризованных дейтронах или в рождении адронных пар с большими поперечными импульсами, исследование функций распределения кварков в продольно- и поперечно-поляризованных нуклонах, изучение поляризации  $\Lambda$  и  $\bar{\Lambda}$ , рожденных в глубоконеупругих процессах, и др. Адронная программа включает изучение реакций Примакова, поиски глюолов и гибридных глюон-кварковых состояний, изучение полуплептонных распадов очарованных частиц, обнаружение дваждыочарованных гиперонов и др. Обе программы требуют детектирования адронов в конечных состояниях реакций.

Блок-схема COMPASS приведена на рис. 1. Это двойной спектрометр, каждый со своим магнитом, системой трековых детекторов и детекторов,

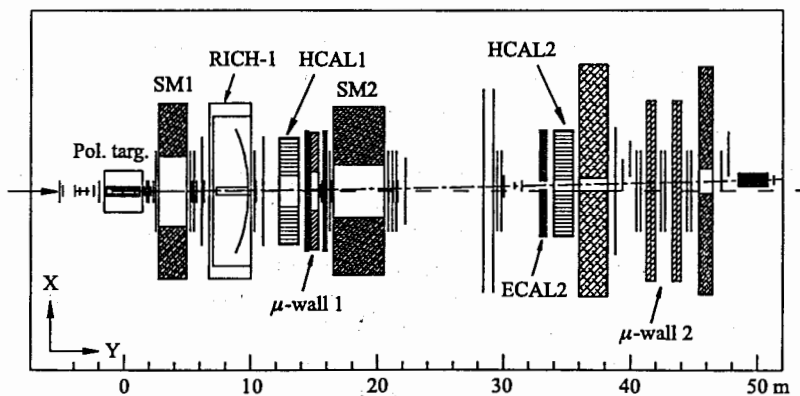


Рис. 1. Блок-схема спектрометра COMPASS: Pol.Targ. — поляризованная  $^6\text{LiD}$ -мишень; SM1, 2 — спектрометрические магниты; RICH1 — черенковский счетчик; ECAL2 — электромагнитный калориметр; HCAL1, 2 — адронные калориметры;  $\mu$ -wall1, 2 — мюонные детекторы; вертикальными линиями обозначены трековые детекторы и триггерные годоскопы

ОБЪЕКТНЫЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕЯ И СЛЕДЯЩИЙ  
БИБЛИОТЕКА

идентифицирующих вторичные частицы: электромагнитных и адронных калориметров ECAL1, 2, HCAL1, 2, мюонных детекторов  $\mu$ -wall 1, 2 и черенковских счетчиков RICH1, 2\*. Для мюонной программы используется поляризованная мишень, а для адронной — жидководородная или твердые мишени. Описание адронного калориметра HCAL1 является целью настоящей работы.

HCAL1 расположен перед мюонным детектором  $\mu$ -wall1. Он идентифицирует и измеряет энергии адронов, рожденных в мишени, а также используется в схеме быстрого запуска (триггера) установки. Для достижения целей, поставленных в проекте [1], адронный калориметр должен иметь энергетическое разрешение  $(\sigma_{\pi}(E))/E \approx 80\%/ \sqrt{E}$  и пространственное разрешение  $\sigma_{x,y} \approx 15$  мм, а также работать во вторичном пучке при нагрузках около  $10^5$ – $10^6$  с<sup>-1</sup> на один модуль.

Описание калориметра построено следующим образом: в разделе 1 кратко упомянуты основные результаты моделирования; раздел 2 посвящен конструкции калориметра и модулей; раздел 3 — исследованию калориметра на тестовых пучках; раздел 4 — системе контроля; раздел 5 — работе калориметра в составе COMPASS; раздел 6 — применению в триггере. В заключении содержатся основные выводы.

## 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ

HCAL1 является калориметром сэмпингового типа и состоит из перемежающихся пластин железа и пластического сцинтиллятора, в которых происходит размножение ядерно-фотонной лавины, вызванной первичной частицей. Ливневые частицы оставляют часть энергии в сцинтилляторах в виде световой вспышки, регистрируемой фотоэлектронным умножителем (ФЭУ). Амплитуда импульса ФЭУ пропорциональна энергии, потерянной частицами ливня в сцинтилляторах модуля, и, соответственно, энергии, оставленной частицей в этом модуле, а сумма амплитуд со всех модулей пропорциональна энергии первичной частицы, если она полностью поглощается в калориметре.

Характеристики калориметра: энергетическое разрешение, пространственное разрешение, отношение амплитудных откликов от электронов и адронов ( $e/\pi$ ), а также оптимальное поперечное сечение и толщина пластин для работы в интервале энергий 10–100 ГэВ — были оценены методом Монте-Карло с помощью моделирующих пакетов программ GEANT [2], GCALOR [3] и приведены в соответствующих местах ниже. Результаты моделирования показали, что при выбранном количестве (40) и толщинах пластин железа и сцинтиллятора (20 и 5 мм соответственно) калориметр поглощает практически всю энергии адронов.

\*ECAL1 и RICH2 пока не установлены.

## 2. КОНСТРУКЦИЯ КАЛОРИМЕТРА

Общая конфигурация и принцип построения адронного калориметра выбраны с учетом требований эксперимента COMPASS, опыта изготовления калориметров в других экспериментах [4–7], а также на основе результатов моделирования. На рис. 2 показан общий вид калориметра.

Калориметр собран из модулей в матрицу — 28 (по горизонтали) × 20 (по вертикали) на специальной ферме. В каждом из четырех углов матрицы удалено по 12 модулей, а в центре калориметра сделано прямоугольное окно размером 8 × 4 модулей. Поперечное сечение калориметра составляет 4,2 × 3 м, а

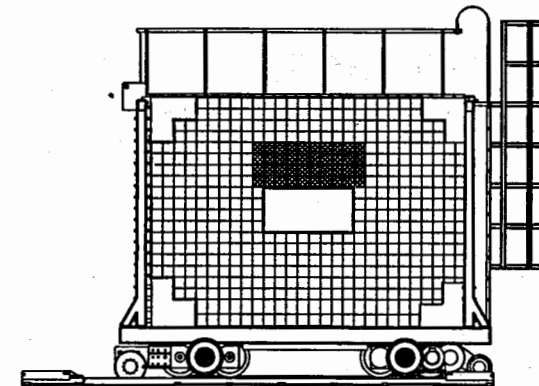


Рис. 2. Общий вид калориметра с подвижной платформой

полезная площадь с учетом окна и удаленных модулей 10,8 м<sup>2</sup>. Конструкция центрального окна не содержит внутри опорных элементов, которые могли бы создать мертвые зоны и являться источником фона из-за взаимодействия в них частиц пучка и вторичных частиц из мишени. Для этого над окном каждый из четырех слоев по 10 модулей скреплен по передней и задней частям корпусов стальными пластинами толщиной 15 мм, шириной 145 мм и длиной 1490 мм в блоки, опирающиеся на боковые модули окна. На рис. 2 эти слои выделены штриховкой.

Расчет и экспериментальная проверка показали, что при нагрузке в 6 т максимальный прогиб в центре окна не превышает 3 мм, если опорами являются крайние модули. Для предотвращения сдвига боковых модулей внутрь окна они прикреплены к ферме дюралюминиевыми полосами сечением 5 × 40 мм.

Калориметр смонтирован на платформе, которая позволяет передвигать его поперек пучка для калибровки, юстировки и технического обслуживания. Перемещение платформы с калориметром осуществляется редукторно-полиспастовым механизмом по стальным рельсам с помощью электродвигателя. Диапазон перемещения составляет ± 2,5 м относительно оси пучка, точность фиксации при остановке — ± 2 мм, а скорость перемещения — 15 см/мин. Подвижная платформа адронного калориметра, в свою очередь, расположена на общей для ECAL1 и HCAL1 платформе, которая позволяет их совместное передвижение вдоль пучка.

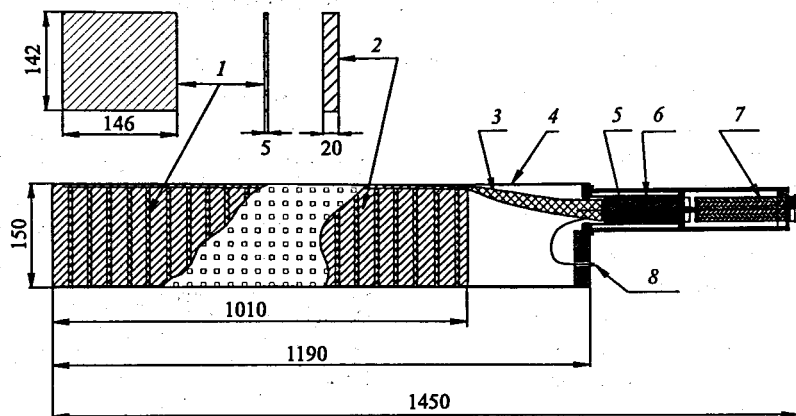


Рис. 3. Конструкция модуля адронного калориметра: 1 — сцинтиллятор; 2 — железные пластины; 3 — световод-переизлучатель; 4 — корпус модуля; 5 — ФЭУ; 6 — магнитный экран; 7 — высоковольтный делитель напряжений; 8 — оптический разъем

#### Основные конструктивные характеристики адронного калориметра

Активная полезная площадь	10,8 м <sup>2</sup>
Число модулей	480
Число слоев железо-сцинтиллятор в модуле	40
Толщина железных пластин	20 мм
Толщина сцинтилляционных пластин	5 мм
Поперечное сечение пластин	142 × 146 мм
Длина световода-переизлучателя	1200 мм
Активная длина световода-переизлучателя	1050 мм
Толщина световода-переизлучателя	3 мм
Длина активной части модуля (калориметра)	1000 мм (4,8 λ <sub>int</sub> )
Полная длина модуля (калориметра)	1450 мм
Вес одного модуля	150 кг
Общий вес калориметра с подвижной платформой	80 т

Конструкция модуля [6] показана на рис. 3, а основные конструктивные характеристики калориметра приведены в таблице. Сорок пластин железа и сцинтиллятора, а также световод-переизлучатель размещаются в корпусе из листовой стали толщиной 1,4 мм с крышкой из того же материала. Пластины сцинтиллятора установлены свободно, но плотно, между пластинами железа. Жесткость конструкции придают четыре регулярные железные пластины, прикрепленные к корпусу с помощью винтов, а также передняя и

задняя пластины, приваренные к корпусу. В двух фиксированных пластинах имеются отверстия с резьбой для такелажных рым-болтов. Задняя пластина имеет съемную часть с отверстием для световода. Наличие съемной части позволяет извлекать световод из модуля без его разборки. К этой же части крепится стальной цилиндрический кожух со стенками толщиной 5 мм, в котором размещается ФЭУ с делителем. На задней стенке установлен также оптический разъем, который соединяет отрезки оптических волокон системы контроля работы модулей от светодиода.

Фотоумножитель помещен в магнитный экран, изолированный от внешнего кожуха диэлектрическими кольцами. Экран изготовлен в виде цилиндра из листового пермаллоя толщиной 0,1 мм и намотан в три слоя. Стальной кожух и пермалловый экран ослабляют внешнее магнитное поле в 10 раз в продольном направлении и в 100 раз в поперечном направлении относительно оси ФЭУ. При сборке калориметра для предотвращения повреждения световодов под действием веса расположенных выше модулей световоды и крышки модулей устанавливались сбоку.

Энергетическое и пространственное разрешение сэмпинг-калориметра существенно зависит от способа изготовления сцинтиллятора, световода-переизлучателя и ФЭУ с делителем. Поэтому при создании HCAL1 особое внимание уделялось их выбору и качественному изготовлению.

Главными требованиями к сцинтилляционным пластинам являются высокий световыход и однородность светосбора по поверхности. При длительной работе с пучками высокой интенсивности важную роль играет также радиационная стойкость сцинтиллятора [7]. Сцинтилляторы калориметра HCAL1 изготовлены из гранулированного полистирола ПСМ-115 методом литья под давлением с добавками пара-терфинила (1,5 %) и РОРОР (0,04 %) [8] и обладают радиационной стойкостью около 1 Мрад. Сцинтиллятор при прохождении через него заряженной частицы излучает свет, максимум спектра которого приходится на длину волны 420 нм. Длина затухания такого света в пластинах равна (60 ± 10) см [8], неоднородность светосбора по поверхности — около 12%. При «маскировании» пластин, когда ближняя к световоду часть пластины (~ 1/3 ее) была обернута черной бумагой, а остальная — металлизированным майларом, неоднородность светосбора уменьшилась до 5% [8].

Сбор света с пластин осуществляется плоским световодом-переизлучателем, помещенным на их открытые торцы, через две капроновые нити толщиной 0,6–0,8 мм. Нити обеспечивают постоянный воздушный зазор и предохраняют световод от механических повреждений железными пластинами. Световоды изготовлены из органического стекла марки СО-95 или СО-120 и окрашены по поверхности спиртовым раствором кумарина К-30. Кумарин переизлучает сцинтилляционный свет в свет с большей длиной волны и с большей длиной затухания в световоде. Окрашивалась только активная часть поверхности световода длиной 1050<sup>+50</sup> мм. Толщина окрашенного слоя из-

менялась в диапазоне 5–20 мкм для обеспечения максимальной однородности светосбора по длине модуля. После окраски световоды подвергались отжигу, который предотвращал растрескивание их поверхности. Внешняя сторона световода покрывалась металлизированным майларом для уменьшения потерь света. Неокрашенный конец световода сводился к фотокатоду ФЭУ методом адиабатического сворачивания (сжатия) в нагретом состоянии. В результате мероприятий по оптимизации светосбора измеренный выход света из одной сцинтилляционной пластины оказался равным 4–6 фотоэлектронам, образовавшимся на фотокатоде ФЭУ при прохождении минимально ионизирующей частицы.

В калориметре использован фотоумножитель жалюзийного типа ФЭУ-84-3 с 12 каскадами умножения и мультищелочным фотокатодом. Его квантовая чувствительность имеет максимум при длине волны около 460 нм и для разных образцов колеблется от 0,18 до 0,26. ФЭУ обладает большим динамическим диапазоном по току (100) и допускает работу со средним током до 5 мА, имеет передний фронт импульса 15–18 нс и длительность импульса на уровне 0,1 амплитуды — 40–50 нс.

В качестве высоковольтного источника и делителя напряжений ФЭУ (далее — делитель) применен программно-управляемый источник на основе схемы умножения Кокрофта–Уолтона, в котором необходимые напряжения на диодных промежутках формируются непосредственно на делителе путем умножения опорного напряжения 100 В [9]. При изготовлении в лабора-

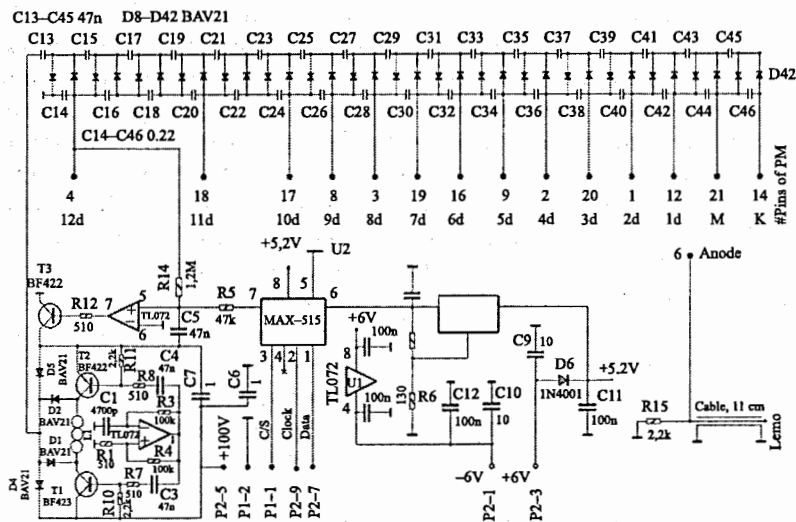


Рис. 4. Принципиальная схема высоковольтного делителя напряжений для ФЭУ

торных условиях он оказывается дешевле источников промышленного типа. Принципиальная схема делителя показана на рис. 4 [10]. Его параметры: диапазон выходных напряжений 2–1700 В; точность регулировки 1,7 В (10 бит); питание  $\pm 6$  В (20 мА, 5 мА) и 100 В (0,2 мА — без загрузки ФЭУ); частота генератора 15 ГГц; пульсации выходного напряжения 1–2 мВ. Делитель компактен, потребляет малый ток, обеспечивает ток через ФЭУ до 2 мА, работает при нагрузках около  $10^6$  с<sup>-1</sup>, стабильность напряжения на аноде около  $10^{-4}$ . Он изготовлен на печатной плате размером 3 × 11 см, с одной стороны которой припаяна многоконтактная панель для ФЭУ, а с другой — панель с укрепленными на ней разъемами для анодного и управляющих сигналов. Делитель экранирован от электромагнитных полей двумя трубками из мягкой стали, изолированными друг от друга латунными кольцами. Внешняя трубка крепится к съемной задней части корпуса модуля. С помощью пружины, размещенной между трубками, ФЭУ с делителем прижимается к выходному торцу световода.

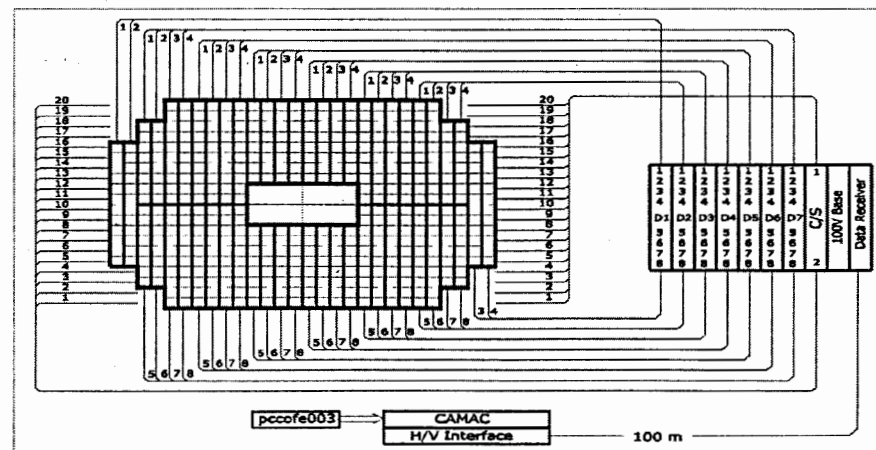


Рис. 5. Блок-схема системы высоковольтного питания калориметра: D1–D7 — блоки данных; C/S — блок выбора горизонтальной линии; 100 V Base — источник опорного напряжения 100 В; Data Receiver — приемник управляющих сигналов; pccofe003 — ЭВМ; H/V Interface — программно-управляемый блок высоковольтной системы

Система высоковольтного питания калориметра состоит из программно-управляемого блока и блоков, обеспечивающих питание делителя ФЭУ (см. рис. 5). Программно-управляемый блок выполнен в стандарте CAMAC и находится на расстоянии 100 м от калориметра в домике экспериментатора. Блоки, обеспечивающие питание делителя ФЭУ, расположены в крейте SAMAC рядом с калориметром. В этом крейте находятся: блок (Data Receiver), принимающий сигналы от программно-управляемого блока (HV In-

terface), блок выбора горизонтальной линии (C/S), 7 блоков данных (D1–D7) и блок опорного напряжения 100 В. Питание  $\pm 6$  В поступает на делители из этого же крейта. Блоки данных предназначены для передачи кодов напряжений на делители, обеспечения их питанием ( $\pm 6$  В, 100 В) и управления защитой по линии 100 В. Передача данных управления высоковольтным напряжением ФЭУ производится последовательным 10-битным кодом. Данные и питание поступают на делитель по пятипарному плоскому кабелю на разъем P2 (на рис. 4 показаны номера контактов разъема P2-1, P2-2 и т.д.). Один блок данных обслуживает восемь субадресов, на каждый из которых подключено параллельно от 6 до 12 делителей. Блок C/S предназначен для выбора горизонтальной линии, на которой находится управляемый модуль и его делитель. Блок имеет 48 выходов, адреса которых задаются пространством шин SAMAC W1–W6, из которых используется 40, т.к. калориметр симметрично разделен на левую и правую половины по 20 горизонтальных линий в каждой.

Весь адронный калориметр по высоковольтному питанию делителей разделен на группы — 20 горизонтальных и 7 вертикальных по четыре столбца в каждой. На каждый столбец модулей подаются управляющие сигналы от одного из семи блоков данных D1–D7. Управление напряжением происходит на модуле, который находится на пересечении выбранных вертикального столбца и горизонтальной линии. По вертикальной линии передается код напряжения, а по горизонтальной — код выбора необходимой линии. Система высоковольтного питания ФЭУ имеет релейную защиту с применением быстрых оплотронов типа 6N138 для групп из 6–12 модулей. Защита срабатывает при аварийном увеличении тока через ФЭУ одного субадреса более 20 мА. Управление защитой осуществляется через ЭВМ программой высоковольтного питания. Если увеличение тока случайное и не вызвано крупными неполадками в делителях, напряжение на модулях может быть включено снова программным путем.

Блок опорного напряжения 100 В выполнен в модуле SAMAC шириной восемь станций и имеет десять независимых выходов (семь рабочих, три запасных) с максимальным током 120 мА каждый. Управление включением блока возможно только при наличии в крейте напряжений  $\pm 6$  В, после чего повышение напряжения до 100 В в каждом канале происходит автоматически за 40–50 с. При аварийном увеличении тока в канале больше 120 мА предусмотрено его автоматическое отключение. На передней панели блока установлены десять микротумблеров и индикаторов состояния (включено/выключено), цифровой вольтметр, переключатель и контрольные клеммы для измерения напряжений и токов в каждом канале. На задней панели блока помещен многоконтактный разъем для подключения блока в систему медленного контроля аппаратуры COMPASS и десять выходных разъемов напряжений 100 В для каждого канала.

Обеспечение высоковольтным питанием ФЭУ производится следующим образом: сначала на делители подается питание  $\pm 6$  В включением крейта, расположенного около калориметра, а потом опорное напряжение 100 В. Затем из домика экспериментатора через программно-управляемый блок устанавливаются необходимые напряжения на все ФЭУ с помощью ЭВМ и программы высоковольтного питания.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ КАЛОРИМЕТРА НА ТЕСТОВЫХ ПУЧКАХ

Основные характеристики калориметра — линейность отклика в зависимости от энергии частиц, энергетическое и пространственное разрешение — были определены в ЦЕРН на пучках отрицательных частиц (пионов, электронов, мюонов) в диапазоне энергий 10–100 ГэВ. Для этого, прежде всего, калориметр был прокалиброван. Калибровкой мы называем определение относительных коэффициентов, необходимых для выравнивания модулей по амплитуде, и установление взаимно однозначного соответствия между амплитудой импульса, зарегистрированной с помощью зарядово-цифрового преобразователя (ADC), и энергией частиц.

Для вычисления энергии использовалось соотношение

$$E = K_E \sum_1^n a_i k_i, \quad (1)$$

где  $n$  — число модулей, зарегистрировавших часть энергии ливня;  $a_i$  — значение амплитуды  $i$ -го канала ADC с вычтенным пьедесталом;  $k_i$  — коэффициенты относительной коррекции, необходимые для выравнивания амплитуд;  $K_E$  — коэффициент абсолютной энергетической привязки, определяемый из условия, что максимум амплитудного спектра соответствует номинальному значению энергии пучка частиц.

Калориметром на тестовом пучке мы называем сборку из 25 модулей, формирующих матрицу  $5 \times 5$ , и установленную на подвижную подставку. Подставка обеспечивала дистанционное перемещение сборки в горизонтальном ( $x$ ) и вертикальном ( $y$ ) направлениях и установку центра каждого модуля относительно оси пучка частиц с точностью 1 мм. Калориметр запускался от совпадений сигналов двух сцинтилляционных счетчиков, двух пропорциональных камер и двух газовых черенковских счетчиков, расположенных на пучке перед модулями. Амплитуды импульсов модулей калориметра регистрировались ADC [10] на основе микросхемы Lecroy MQT200 с линейной шкалой до 4096-го канала.

Процедура калибровки осуществлялась следующим образом: сначала центр каждого модуля в сборке облучался пучком и по амплитудным спектрам

каждого модуля определялись коэффициенты  $k_i$ . Амплитуда центрального модуля принималась за 1, а амплитуды остальных модулей сравнивались с ним. Затем при прохождении пионов, мюонов или электронов через центральный модуль сборки  $5 \times 5$  снимались спектры сигналов со всех модулей. Информация записывалась в ЭВМ и обрабатывалась в режиме офф-лайн с целью получения спектров энерговыделения от частиц пучка. Для перевода амплитудных спектров в спектры энерговыделения использовалось несколько реперных точек: номера каналов ADC, содержащие максимумы спектров от пионов и электронов, и соответствующие им номинальные значения энергий пучков (10, 20, 40, 60, 80, 100 ГэВ). Используя эти точки, определили коэффициенты  $K_E^\pi = (31 \pm 1)$  МэВ/(канал ADC) для пионов и  $K_E^e = (36 \pm 1)$  МэВ/(канал ADC) для электронов как отношения энергии пучка к номеру канала ADC, соответствующего максимуму амплитудного спектра.

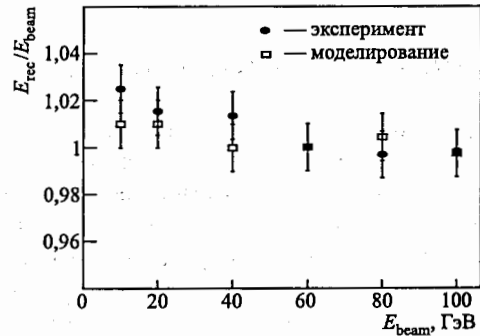


Рис. 6. Зависимость отношения  $E_{rec}/E_{beam}$  от энергии пучка адронов: ● — эксперимент, □ — моделирование

Эти коэффициенты в пределах ошибок оказались одинаковыми при всех энергиях, что указывает на линейность отклика калориметра в данном диапазоне энергий. Максимумы амплитудных спектров тестового диапазона энергий лежали в интервале от 316 (пионы 10 ГэВ) до 3030 (пионы 100 ГэВ) канала ADC. Аналогичная процедура проводилась для всех 480 модулей калориметра, сгруппированных в 19 сборок.

На рис. 6 показана зависимость отношения энергии, зарегистрированной калориметром  $E_{rec}$ , к энергии пучка  $E_{beam}$ , от энергии пучка пионов. Спектры энерговыделения в сборке, полученные на пучках мюонов и пионов с энергией 10 ГэВ, приведены на рис. 7. Сплошные линии — результат аппроксимации спектра от мюонов распределением типа Ландау, а от пионов — распределением Гаусса. При этом для обоих спектров энерговыделения использовался коэффициент  $K_E^\pi$ , определенный для пионов. Максимум спектра энерговыделения от мюонов оказался при энергии 1,63 ГэВ, а максимум спектра энерговыделения от пионов соответствует энергии пучка. Поскольку в пионном пучке есть примесь мюонов, их присутствие также видно на этом рисунке. На рис. 8 показаны спектры энерговыделения пионов и электронов при энергии пучков 20 и 80 ГэВ и их аппроксимация распределениями Гаусса (сплошные кривые). При переводе соответствующих амплитудных спектров в спектры энерговыделения использовались коэффициенты  $K_E^\pi$  и  $K_E^e$ , опре-

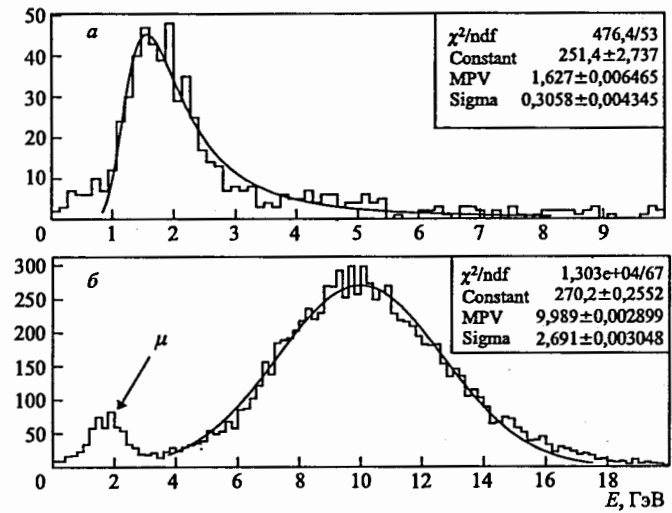


Рис. 7. Спектры энерговыделения в сборке модулей мюонами (а) и пионами и мюонами (б) при энергии пучка 10 ГэВ

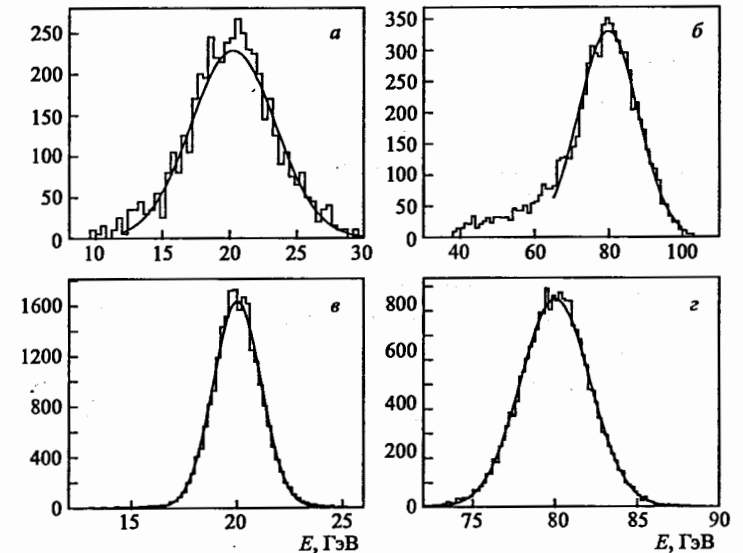


Рис. 8. Спектры энерговыделения в сборке модулей от пионов (а, б) и электронов (в, г) при энергиях 20 (а, в) и 80 ГэВ (б, г)

деленные для пионов и электронов. Поэтому максимумы спектров их энерговыделений точно соответствуют энергии пучка. Значения дисперсий  $\sigma_\pi(E)$  и  $\sigma_e(E)$  этих распределений характеризуют энергетическое разрешение калориметра для адронов и электронов соответственно.

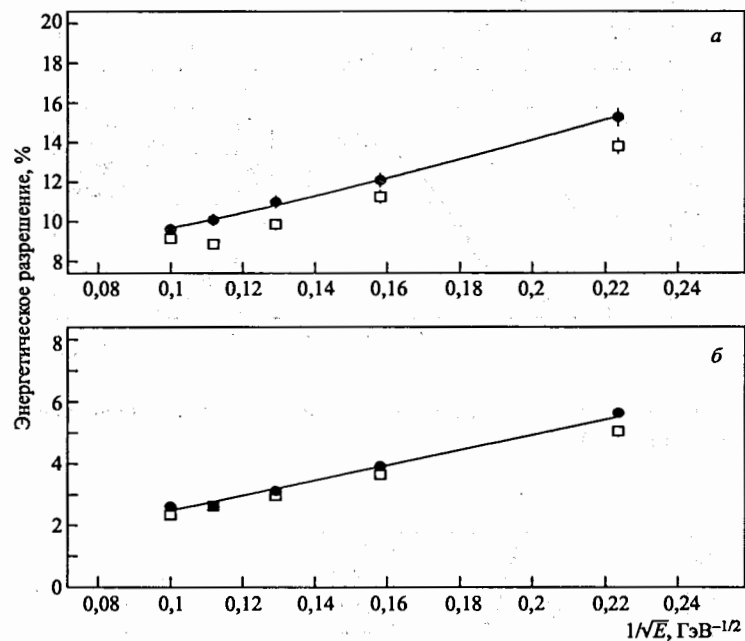


Рис. 9. Энергетические разрешения калориметра для пионов (а) и электронов (б): ● — эксперимент, □ — моделирование. Линии — аппроксимация измерений выражениями (2) и (3)

На рис. 9 показаны зависимости разрешения калориметра для пионов и электронов от энергии вместе с результатами моделирования. Они описываются выражениями:

$$\frac{\sigma_\pi(E)}{E} = \frac{59,4 \pm 2,9}{\sqrt{E}} \oplus (7,6 \pm 0,4) \%, \quad (2)$$

$$\frac{\sigma_e(E)}{E} = \frac{24,6 \pm 0,7}{\sqrt{E}} \oplus (0,7 \pm 0,4) \%, \quad (3)$$

где  $E$  — в ГэВ.

Среднее значение отношения  $e/\pi$ , вычисленное по положению максимумов амплитудных спектров электронов и пионов при одинаковой энергии в диапазоне 10–100 ГэВ, оказалось равным  $e/\pi = 1,2 \pm 0,1$ .

Пространственное разрешение калориметра было измерено путем сканирования пучком центрального модуля сборки  $5 \times 5$  по  $x$ - и  $y$ -координатам и нахождения центра тяжести ливня по амплитудам сигналов всей сборки. При аппроксимации разности между координатой точки входа падающей частицы в модуль и координатой центра тяжести ливня распределением Гаусса определялось стандартное отклонение  $\sigma_{x,y}$ . Зависимость  $\sigma_x$  от координаты пучка в модуле приведена на рис. 10 вместе с данными моделирования. Видно, что в центре модуля  $\sigma_x = (14 \pm 2)$  мм.

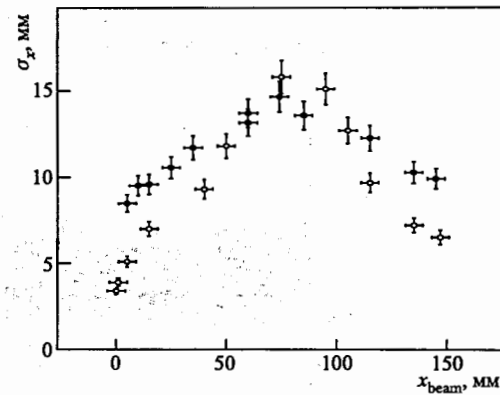


Рис. 10. Зависимость пространственного разрешения калориметра от координаты пучка в модуле: ● — эксперимент, □ — моделирование

#### 4. СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КАЛОРИМЕТРА

Система контроля стабильности работы калориметра построена на основе одного светодиода (LED) с высоким световыходом типа MARL 110106, максимум спектра которого соответствует длине волны 470 нм. С помощью этой системы устанавливается соответствие между амплитудами сигналов ФЭУ от светодиодов и от частиц пучка и осуществляется контроль стабильности работы всего измерительного тракта включая ADC. Свет от одного светодиода распределяется по всем 480 модулям и передается к фотокатодам через оптические волокна диаметром 1 мм и оптические разъемы, которые расположены на задней части модулей рядом с ФЭУ. Распределение света от диода производится ступенчато: сначала свет делится на 30 групп, а затем каждая группа делится еще на 16 каналов. Для контроля сигналов от светодиода используется фотодиод (PIN-диод) фирмы Hamamatsu. PIN-диод также расположен на ферме калориметра и засвечивается от LED. Амплитуда его сигнала через отдельный канал ADC совместно с амплитудами сигналов от светодиода с каждого модуля считывается системой сбора данных спектрометра COMPASS между циклами ускорителя.

На рис. 11 приведено распределение относительных амплитуд от светодиодов для всех модулей калориметра, регистрировавшихся в течение трехмесячного сеанса набора данных в 2003 г. Значение амплитуды каждого модуля в текущий момент времени  $A$  поделено на значение амплитуды в начальный



момент времени,  $A(\text{ref})$ . Типичные отклонения амплитуд модулей от первоначальных составляли не более 5% и носили случайный характер.

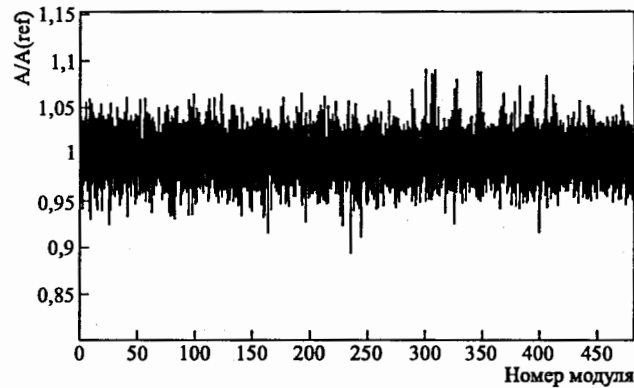


Рис. 11. Распределение относительных амплитуд сигналов калориметра от светодиодов в течение сеанса набора данных в 2003 г.

## 5. РАБОТА КАЛОРИМЕТРА В СОСТАВЕ COMPASS

Перед началом каждого сеанса работы COMPASS проводилась проверка калибровки модулей HCAL1 с помощью мюонов гало пучка M2 ЦЕРН в реальных условиях с использованием рабочих длин кабелей и новых ADC типа FI ADC-64 [11] со шкалой до 4096-го канала. Калориметр запускался либо от двух сцинтилляционных счетчиков, размещенных спереди на подвижной подставке, либо одним из стандартных триггеров установки. Измерялись как амплитуды, так и относительные временные задержки сигналов каждого модуля для их последующего выравнивания. Амплитуды выравнивались с точностью  $\pm 10\%$  (требование электроники выработки триггера первого уровня) установкой соответствующего высоковольтного напряжения на ФЭУ.

Амплитудные спектры с помощью калибровочного коэффициента  $K_E^T$ , определенного на тестовых пучках, пересчитывались в спектры энерговыделений. Спектры энерговыделения мюонов в одной из групп калориметра показаны на рис. 12. Положения максимумов одинаковы для всех модулей, как этой, так и остальных групп. На тестовых пучках было показано, что максимум спектра от 10-ГэВ мюонов соответствует энергии 1,63 ГэВ. На канале M2 мюоны гало пучка имеют более высокую энергию. Поэтому при той же калибровке, а также с учетом использования новых ADC максимумы амплитудных спектров от мюонов гало пучка оказались при энергии 1,8 ГэВ.

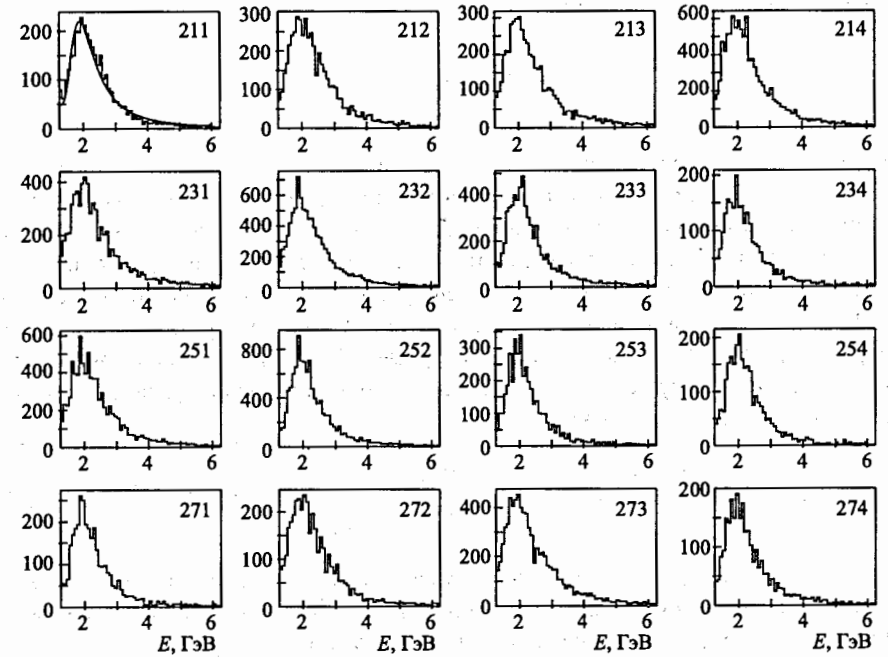


Рис. 12. Пример спектров энерговыделения мюонами гало пучка M2 в отдельных модулях. Для модуля 211 показана аппроксимация спектра распределением типа Ландау

Спектр распределения времен прихода сигналов от всех модулей калориметра и его аппроксимация распределением Гаусса представлены на рис. 13. Все модули выравнены по времени прихода сигналов с точностью 1,4 нс.

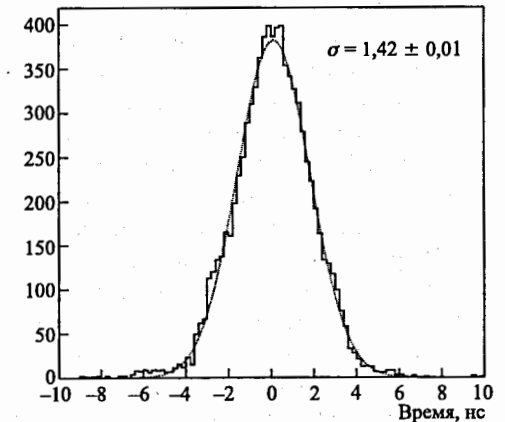


Рис. 13. Спектр распределения времен прихода сигналов со всех модулей калориметра и его аппроксимация распределением Гаусса

В стандартном режиме работы установки амплитуды импульсов каждого модуля, соответствующие данному триггеру, считываются системой сбора данных. При офф-лайн-обработке определение энергии зарегистрированных

адронов проводилось по формуле

$$E = \sum_1^n a_i K_{E_i}^{\pi} K_{LED_i}, \quad (4)$$

где  $n$  — число соседних модулей (кластер, см. ниже) с амплитудой выше некоторой;  $a_i$  — амплитуды модулей, входящих в кластер;  $K_{E_i}^{\pi}$  — коэффициенты коррекции амплитуд, определенные для каждого модуля делением 1,8 ГэВ на номер канала ADC, который соответствует максимуму спектра от мюонов в каждом модуле, т.к. модули по амплитуде выравнены с точностью только  $\pm 10\%$ . В дальнейшем эта калибровка проверена по зарегистрированным адронам разных энергий (см. рис. 14, график 9);  $K_{LED_i}$  — коэффициенты относительной коррекции, учитывающие изменение амплитуд в отдельных модулях с течением времени:

$$K_{LED_i} = \frac{LED_i^{t_0}}{LED_i^t} \cdot \frac{A_{PIN}^t}{A_{PIN}^{t_0}}, \quad (5)$$

где  $LED_i^{t_0}$  ( $LED_i^t$ ) — амплитуда сигнала каждого модуля от светодиода в начальный (текущий) момент времени;  $A_{PIN}^t$  ( $A_{PIN}^{t_0}$ ) — амплитуда сигнала PIN-диода в текущий (начальный) момент времени.

При наборе данных по мюонной программе в COMPASS используется несколько триггеров [12, 13]. Среди них есть инклюзивный триггер, построенный на основе сцинтилляционных годоскопов, регистрирующих падающие и рассеянные в мишени мюоны. Эти мюоны должны проходить через центральное отверстие калориметра. В калориметр попадают другие частицы, рожденные в данном событии и зарегистрированные трековыми детекторами до и после магнита SM1. Кроме сигналов, вызванных в калориметре частицами, есть сигналы, связанные с шумами, возникающими в его электронике. Измерения без пучка показали, что появление шумов выше 0,5 ГэВ маловероятно. Для уменьшения количества информации, оставляемой для дальнейшего анализа, установлен порог на уровне 0,8 ГэВ.

На рис. 14 приведены примеры спектров энерговыделений в калориметре ассоциированными частицами для одного из периодов работы. Ассоциированными здесь названы частицы, которым соответствуют треки, найденные программой геометрической реконструкции COMPASS — CORAL [14] и экстраполированные в HCAL1. При этом для каждого из спектров 1–8 отбирались события, когда число модулей, образовавших кластер, было больше чем 3 и импульс ассоциированного трека, восстановленный в CORAL, был в интервале  $\sim 0,25$  ГэВ/с вокруг значений около  $\sim 5, 7-34$  ГэВ/с. Под кластером здесь подразумевается число соседних модулей, в которых выделилось более чем 90% энергии всего ливня. Этот конкретный критерий отбирает

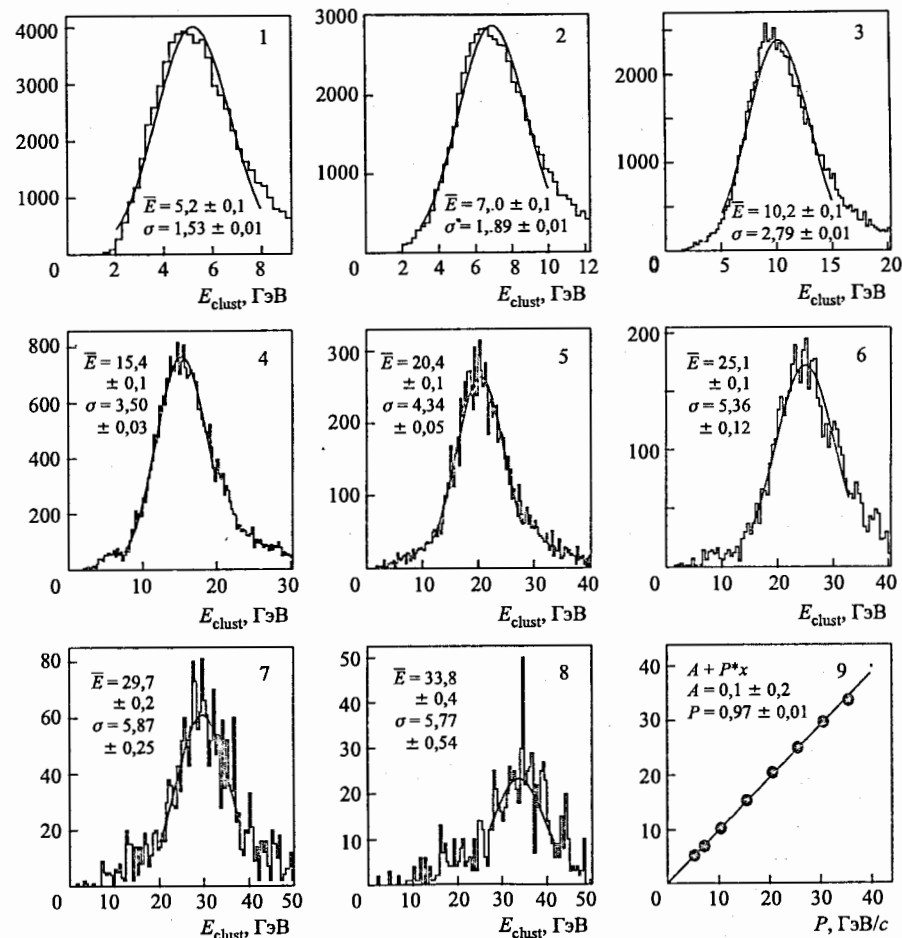


Рис. 14. Спектры энерговыделений в калориметре ассоциированными частицами разных импульсов в интервале 5–34 ГэВ/с (графики 1–8); зависимость восстановленной энергии от импульса ассоциированных частиц (график 9)

события, когда энергия частицы восстанавливается по кластерам, включающим четыре или больше модулей, и соответствует развитым ядерным ливням. Ливни, оставляющие энергию в одном-трех соседних модулях, исключены из этого анализа. Распределения энерговыделений для каждого интервала фитировались гауссовской функцией. На графике 9 рис. 14 показана зависимость энергии частиц, измеренной таким образом для каждого импульсного интер-

вала, от импульса частиц. Эта зависимость хорошо аппроксимируется прямой линией  $E_{\text{гес}} = A + B \cdot p$ , где постоянный член  $A = 0,1 \pm 0,2$  в пределах ошибок равен нулю, а наклон прямой  $B = 0,97 \pm 0,01$  дает значение поправочного фактора для коэффициентов  $K_{E_i}^\pi$ , выбранных процедурой калибровки калориметра мюонами гало. Анализ работы калориметра в эксперименте при более высоких энергиях ограничен имеющейся статистикой событий.

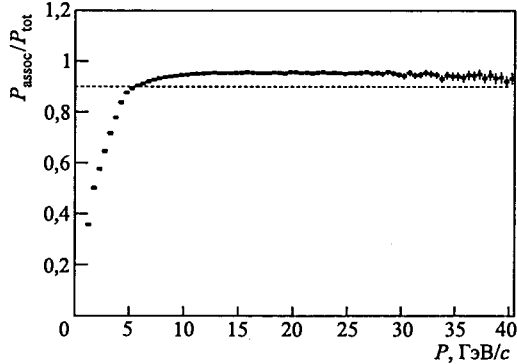


Рис. 15. Зависимость эффективности регистрации адронов в HCAL1 от импульса ассоциированных частиц

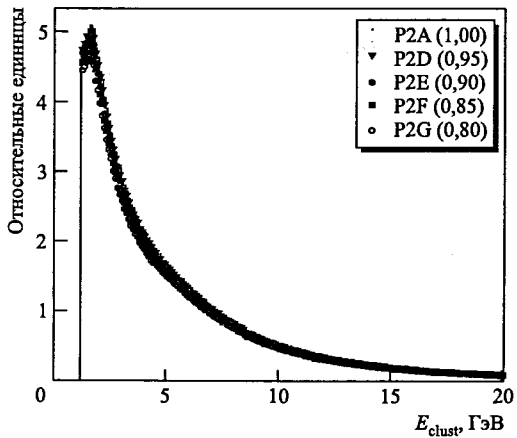


Рис. 16. Спектры энергий частиц, зарегистрированных калориметром в течение длительного периода времени. Показаны также факторы, введенные для наглядности представления данных

При правильно выбранных напряжениях на ФЭУ и порогах ADC калориметр, как электронный прибор, должен иметь практически 100%-ю эффективность. В случае с HCAL1 в определение эффективности калориметра входит также эффективность программы поиска кластеров и реконструкции их энергии. Полная эффективность HCAL1 в зависимости от импульса частиц показана на рис. 15. Отбирались события, в которых треки экстраполирова-

лись в HCAL1. Видно, что при  $P > 5$  ГэВ/с полная эффективность HCAL1 близка к 100 %.

На рис. 16 представлены спектры всех зарегистрированных калориметром частиц, прошедших через первую ступень спектрометра COMPASS и HCAL1 и восстановленных программой геометрической реконструкции. Они соответствуют нескольким периодам работы ускорителя (P2A-P2G) в течение сеанса 2002 г., длившегося более трех месяцев, и демонстрируют стабильную работу HCAL1. Более подробно обработка данных, полученных с калориметра, описана в [15].

Во время набора данных для контроля работы калориметра оперативно использовались две программы: программа COOOL [16], созданная для всего спектрометра COMPASS, и программа «Монитор HCAL1», написанная только для контроля адронного калориметра HCAL1. Обе программы могут работать в он-лайн- и офф-лайн-режимах и выдавать гистограммы, полученные за определенный промежуток времени, как для всего калориметра, так и для его отдельных частей. Для примера на рис. 17 приведены двумерные распреде-

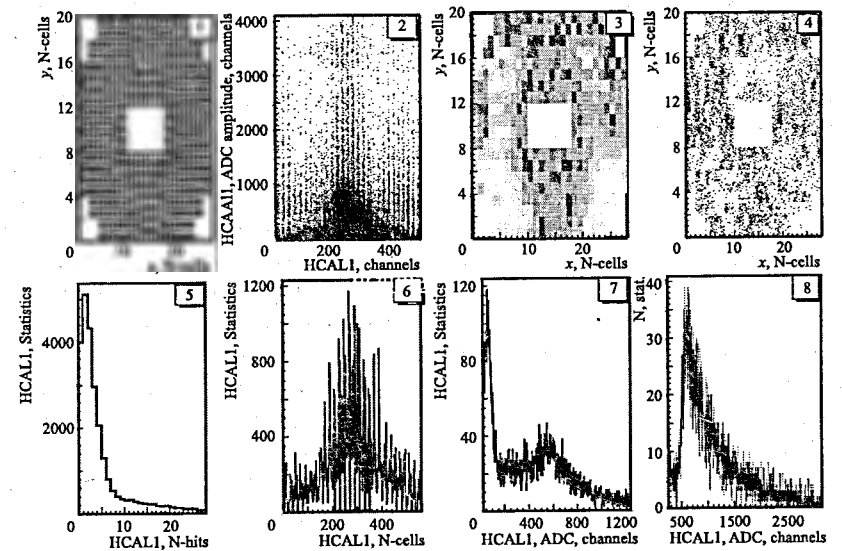


Рис. 17. Двумерные и одномерные распределения событий в HCAL1, полученные программой COOOL: 1 — частота срабатывания модулей калориметра; 2 — распределение амплитуд в модулях; 3 — двумерное распределение амплитуд в модулях; 4 — распределение шумов в модулях; 5 — множественность срабатывания модулей; 6 — частота срабатывания модулей; 7 — суммарные амплитуды без наложения порога; 8 — суммарные амплитуды с наложением порога в триггере

ления и гистограммы, полученные с помощью программы COOOL в режиме он-лайн. Размер прямоугольников, изображающих модули на двумерных распределениях ( $x, y$ ), позволяет качественно определять частоту срабатывания отдельных модулей (двумерные распределения 1, 4) или амплитуду в них (двумерное распределение 3).

В программе «Монитор HCAL1» могут выводиться амплитудные спектры любой из 30 групп, спектры амплитуд отдельных модулей от пучка или от светодиода, а также PIN-диода контрольной системы, суммарный энергетический спектр калориметра, двумерное распределение  $x, y$ , корреляция сумм ADC калориметра и триггерных сумм (см. раздел 6) и др.

## 6. ПРИМЕНЕНИЕ КАЛОРИМЕТРА ДЛЯ БЫСТРОГО ЗАПУСКА СПЕКТРОМЕТРА

Модульная структура HCAL1 позволяет использовать его в системе так называемого быстрого калориметрического триггера (первого уровня) COMPASS [12, 13]. Такой триггер отбирает события с заданным минимальным числом адронов и их энергий в конечном состоянии. Из моделирования калориметра методом Монте-Карло известно, что при энергии одиночного адрона больше 10 ГэВ более чем 90% его энергии выделяется в цилиндре радиусом  $\sim 20$  см, равным длине ядерного взаимодействия. Следовательно, сигнал, соответствующий почти полной энергии адрона, может быть получен суммированием с площади  $60 \times 60$  см, т.е. группы  $4 \times 4$  модулей. Такая операция выполняется за 300–400 нс на схемах аналогового суммирования [12]. После этого результирующий сигнал от группы поступает на совпадение со сцинтилляционными годоскопами, регистрирующими падающий и рассеянный мюоны. При использовании дискриминаторов со следящим порогом (CFD) для таких совпадений достигнуто временное разрешение  $\sim 1,4$  нс [13].

Суммирование сигналов с модулей HCAL1 производится триггерными боксами, расположенными рядом с фотоумножителями сзади калориметра. На каждый бокс подаются сигналы с 16 ФЭУ из группы  $4 \times 4$  (четыре ячейки  $2 \times 2$  модулей) отрезками кабеля переменной длины 0,6–2 м. С помощью этих кабелей выравнены задержки выходных сигналов со всех модулей калориметра. Выравнивание задержек осуществлялось после проведения калибровки и измерения относительных задержек сигналов модулей. На входе триггерного бокса производится разветвление анодного сигнала ФЭУ на два сигнала, один из которых используется для суммирования (S-1) (рис. 18), а другой — через кабель 50 Ом длиной 140 м подается на блоки быстрых ADC для последующей записи амплитуды сигнала в ЭВМ совместно с другой информацией о данном событии. Сигналы с выхода триггерных боксов — четыре суммы сигналов  $2 \times 2$  модулей — передаются по кабелю со скрученными парами

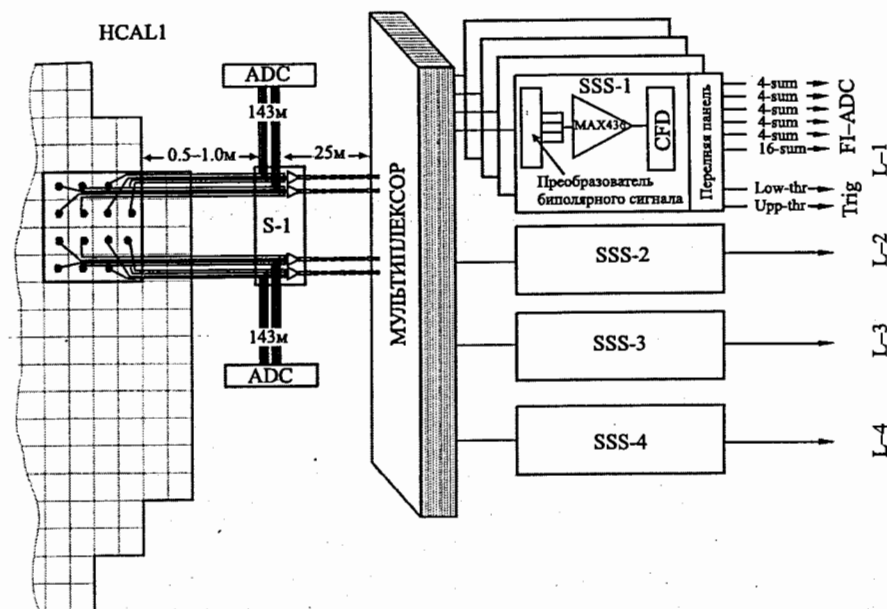


Рис. 18. Блок-схема суммирования аналоговых сигналов модулей HCAL1 для использования в триггере: S-1 — первая ступень суммирования; SSS1-4 — вторые ступени суммирования; CFD — дискриминатор со следящим порогом; Low-thr — выход с низким порогом; Upp-thr — выход с высоким порогом; Trig — триггерная логика; L(1–4) — триггерные слои

длиной 25 м в домик экспериментатора, где пассивно разветвляются на четыре сигнала и используются для формирования четырех «триггерных слоев», покрывающих всю поверхность калориметра (см. рис. 18) [13]. В дальнейшем сигналы со слоев через мультиплексор подаются на вторую ступень суммирования (SSS1-4). После суммирования они поступают на дискриминаторы со следящим порогом (CFD) с двумя программно-управляемыми выходами, соответствующими разным энергиям адронов: 1-й — на уровне около 5 ГэВ (Low-thr), 2-й — на уровне около 10 ГэВ (Upp-thr). С выходов CFD сигналы направляются на триггерную логику.

Аналоговые суммарные сигналы от групп по 16 модулей —  $4 \times 4$  — поступают на блок триггерного ADC для контроля. Соответствующие им логические сигналы для двух порогов CFD поступают на преобразователи времени-цифра (TDC) для контроля разброса времен прихода калориметрического триггера. На двумерном графике рис. 19 иллюстрируется работа адронного калориметра с калориметрическим триггером спектрометра на пучке 160-ГэВ

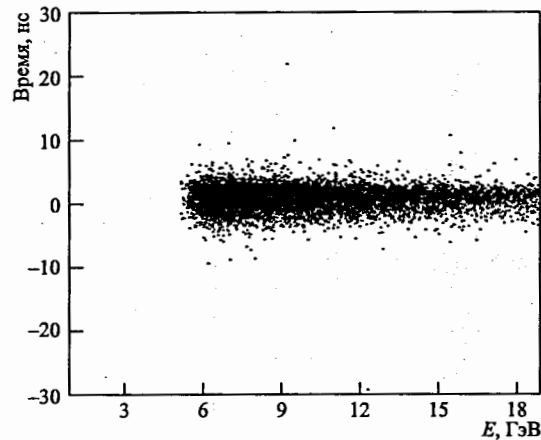


Рис. 19. Двумерное распределение амплитудных сумм ADC и разброса времен прихода соответствующих сумм с тригерных боксов в калориметрический триггер

мюонов. Хорошо виден порог 5 ГэВ, установленный для энергии адрона. Более подробно использование калориметрических сигналов для запуска спектрометра вместе со схемами суммирования изложено в работах [12, 13].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан адронный калориметр HCAL1 для эксперимента NA58 (COMPASS) на канале M2 ускорителя SPS, ЦЕРН. Калориметр используется как автономно, так и для выработки триггера установки. Он состоит из 480 модулей, имеющих поперечное сечение  $15 \times 15$  см и собранных в матрицу с площадью  $4,2 \times 3$  м и прямоугольным отверстием в центре  $1,2 \times 0,6$  м. Каждый модуль содержит 40 слоев железо-сцинтиллятор, а его полная толщина равна 4,8 ядерных длин взаимодействий. Энергетическое разрешение калориметра для адронов (пионов) и электронов в интервале энергий 10–100 ГэВ, а также пространственное разрешение были определены на тестовых пучках:  $(\sigma_\pi(E))/E = (59,4 \pm 2,9)/\sqrt{E} \oplus (7,6 \pm 0,4) \%$ ;  $(\sigma_e(E))/E = (24,6 \pm 0,7)/\sqrt{E} \oplus (0,7 \pm 0,4) \%$ ;  $\sigma_{x,y} = (14 \pm 2)$  мм соответственно. Среднее значение отношения  $e/\pi$ , характеризующего амплитудные отклики калориметра при регистрации электронов и адронов одинаковой энергии, равно  $1,2 \pm 0,1$ . Линейность калориметра при определении энергии частиц, установленная на тестовых пучках, подтверждена в диапазоне 5–35 ГэВ анализом данных, записанных в ходе эксперимента. При более высоких энергиях анализ данных ограничен статистикой. Калориметр работал

стабильно в течение длительных периодов набора данных с эффективностью, близкой к 100 %.

В заключение коллектив авторов выражает большую признательность А. Н. Сисакяну, В. Д. Калагину, А. Г. Володько за внимание и постоянную поддержку работы.

Авторы благодарны коллективу ЦОЭП ЛФЧ под руководством А. П. Дергунова за большой объем работ, выполненных при создании модулей калориметра.

Авторы выражают большую благодарность Э. А. Гарифьянову и И. А. Медведеву за работу при сборке и модернизации калориметра.

Авторы благодарны А. В. Пиляру за помощь при изготовлении ADC и консультации по управлению высоковольтным питанием ФЭУ.

Авторы признательны В. А. Аносову, И. М. Мельниченко, С. В. Черкасову, В. А. Богданову, Л. Г. Игнатовой, И. В. Шестовой за техническую помощь в ходе выполнения работ, М. Г. Кадыкову, В. Г. Кривохижину, Г. И. Смирнову и В. П. Обудовскому за участие в работах на ранних этапах, С. В. Донскову, В. Н. Колосову и др. нашим коллегам из ИФВЭ (Протвино), а также многим членам сотрудничества COMPASS за постоянную помощь и полезные обсуждения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *The COMPASS Collaboration*. COmmon Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy, Proposal to the CERN SPSLC, CERN/SPSLC 96-14, SPSC/P 297, March 1, 1996, Addendum, CERN/SPSLC/96-30, SPSLC/P 297 Add. 1, May 20, 1996.
2. *Brun R., Gartminati F.* GEANT 3.21, CERN, Program Library.
3. *Gabriel T. A.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1991. V. 319. P. 106.
4. *Wigmans R.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1987. V. 259. P. 389.
5. *Leroy C., Rancoita P. G.* // Rep. Prog. Phys. 2000. V. 63. P. 505–606.
6. *Алеев А. Н. и др.* Препринт ОИЯИ P1-89-434. Дубна, 1989.
7. *Арефьев В. А. и др.* // Краткие сообщения ОИЯИ. 1996. № 5[79]-96. С. 15.
8. *Кадыков М. Г., Семенов В. К., Суздаев В. И.* Препринт ОИЯИ 13-90-16. Дубна, 1990.
9. *Hubbeling L.* CERN/ECP 92-10, CERN, Geneva, 1992.
10. *Mikhailov Yu. V.* Private communication.

11. *Konorov I.* Private communication.
12. <http://wwwcompass.cern.ch/compass/detector/trigger/muon-trigger/welcome.html>.
13. *Hannapel J. et al.* The COMPASS Trigger System for Muon Scattering. Submitted to Nucl. Instrum. Meth.
14. <http://coral.web.cern.ch/coral/>.
15. <http://wwwcompass.cern.ch/compass/note/2003-6>.
16. <http://wwwcompass.cern.ch/compass/detector/daq/welcome.html>.

Получено 30 ноября 2004 г.