

в центральную библиотеку ОИЯИ

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

13-97-356

На правах рукописи
УДК 539.1.074.2

К-138

КАДЫКОВ
Михаил Георгиевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
АДРОННЫХ КАЛОРИМЕТРОВ ЯЧЕИСТОГО ТИПА
СО СВЕТОВОДАМИ-СМЕСТИТЕЛЯМИ СПЕКТРА
НА ПУЧКАХ У-70 ИФВЭ**

Специальность: 01.04.01 — техника
физического эксперимента, физика приборов,
автоматизация физических исследований

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1997

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В рамках осуществления в ИФВЭ(г.Протвино) программы "Меченые нейтрино" необходимо было создать адронный калориметр полного поглощения для надежной идентификации мюонов и измерения импульсов адронов от распадов заряженных К-мезонов. Требования регистрации частиц на большой площади ($4 \times 4 \text{ м}^2$) с высоким координатным и энергетическим разрешением и, вместе с тем, жесткие пространственные ограничения по пучку, потребовали проведения длительных и тщательных методических исследований.

Цель диссертационной работы заключалась в разработке, создании и исследовании основных физических параметров модулей детектора адронов полного поглощения с апертурой $4 \times 4 \text{ м}^2$.

Научная новизна исследований определяется следующим:

-впервые детально и систематически проведены экспериментальные исследования основных характеристик ячеистого детектора типа "сэндвич" сталь-сцинтиллятор со сбором света световодом-смесителем спектра в диапазоне энергий 5-40 Гэв: зависимость отклика калориметра от координаты точки входа адрона в ячейку, энергетическое и пространственное разрешение, эффективность разделения адронов и электронов и т.д.

-впервые измерен прямой вклад черенковского излучения, развивающегося в световоде-смесителе спектра, в энергетическое разрешение адронного калориметра и получена зависимость величины излучения от координаты попадания частицы в детектор.

-впервые исследовано влияние прозрачности спектросмещающего световода и флуктуаций продольного развития ядерного каскада на энергетическое разрешение адронного "сэмплинг"-калориметра. Показано, что разработанная методика оптимизации длины затухания переизлученного света в световоде позволяет компенсировать вытекание энергии в продольном направлении и тем самым получать предельно допустимое разрешение для калориметров неполного поглощения в заданном диапазоне энергий. Это будет особенно существенно в Тэв-ной области энергий при создании коллайдерных установок.

Практическая ценность. В ОИЯИ разработана методика и технология создания модулей ячеистых адронных калориметров, что позволило в относительно короткие сроки создать самый крупный в ОИЯИ и ИФВЭ(г.Протвино) детектор адронов полного поглощения АК-600(апертура 16 м^2 , количество модулей - 592). Также в целях сокращения сроков создания детектора был разработан и внедрен в промышленность способ изготовления сцинтилляторов методом литья под давлением на термопластавтоматах. Результаты испытаний позволили сделать вывод о большой перспективности данного метода, так как полученные таким образом образцы не уступали по световыходу и однородности светособирания экструдированным и изготовленным путем механической обработки блочного сцинтиллятора, а по технологичности производства значительно их превосходили.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

ГАВРИЩУК
Олег Петрович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

ПАНЕБРАТЦЕВ
Юрий Аватольевич

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

РЕШЕТИН
Андрей Игоревич

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт физики высоких энергий, г. Протвино

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 199 года в " ____ " часов
на заседании диссертационного совета Д-047.01.02 при Лаборатории высоких
энергий Объединенного института ядерных исследований по адресу:
141980, г.Дубна Московской области, ЛВЭ ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан " ____ " _____ 1997 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор ф.-м. наук, профессор

Л.Ф.Лихачев

М.Ф.Лихачев

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Апробация диссертации. Результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на научных семинарах ОИЯИ, на рабочих совещаниях коллаборации "Меченые нейтрино", на Международной конференции НЕХАМ-89(г.Бехиц, ЧССР) и опубликованы в виде препринтов ОИЯИ и в периодических научных изданиях.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 72 наименований. Общий объем диссертации составляет 84 страницы, включая 51 рисунок и 6 таблиц.

Содержание работы

Во введении изложены основные преимущества калориметров полного поглощения перед другими типами детекторов, сформулирована цель диссертационной работы и дано краткое содержание глав.

В первой главе приведены основные свойства адронных ливней, дан краткий обзор основных характеристик адронных спектрометров полного поглощения и приведены параметры некоторых наиболее известных калориметров.

Во второй главе рассмотрены вопросы, связанные с конструктивными особенностями модулей адронного калориметра. Изложены основные соображения по выбору конкретной "сэмплинг"-структуры; описана технология производства сцинтилляторов методом литья под давлением и приведены сравнительные экспериментальные данные по исследованию физических характеристик изготовленных сцинтилляционных пластин; описаны технология изготовления и методика покраски поверхностных спектросмещающих световодов, используемых в АК-600; обоснован выбор конкретного типа фотоумножителя.

Схематический чертеж модуля представлен на Рис. 1. Модуль представляет собой "сэндвич" из чередующихся пластин стали толщиной 20 мм(40 шт.) и сцинтиллятора толщиной 5 мм(40 шт.). Полная толщина модуля по пучку составляет 4,97 ядерные длины.

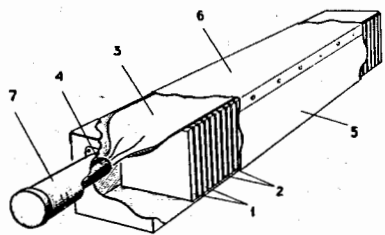


Рис.1. Конструкция модуля адронного калориметра: 1 - стальные поглотители $d=20$ мм, 2-пластические сцинтилляторы $d=5$ мм, 3-световод-сместитель спектра, 4-ФЭУ 84-3, 5-корпус модуля, 6-крышка модуля, 7-отверстие ФЭУ.

Сцинтилляционные пластины изготавливались методом литья под давлением из гранулированного полистирола РСМ-115 и спектросмещающих добавок РРО(1,5%) и РОРОР(0,05%). Для повышения световыхода каждая сцинтилляционная пластина оборачивалась алюминизированным майларом толщиной 12 мкм, а для улучшения однородности светособирания ее ближний к световоду край оборачивался черной бумагой.

Световод-сместитель спектра изготавливался в лабораторных условиях в виде пластины из органического стекла марки СО-95 толщиной 3 мм с поверхностным переизлучателем. Сместитель спектра(1,5 дифенил-3-стирил-пиразолин) наносился только в зоне расположения сцинтиллятора, а ближняя к ФЭУ часть не окрашивалась. Люминофор на глубине световода порядка 5 мкм образовывал поверхностное покрытие, толщина которого варьировалась по длине с целью получения максимальной однородности светосбора. Торец световода-сместителя совмещался с фотокатодом ФЭУ 84-3 путем термоформования на специальном приспособлении при разогреве оргстекла выше температуры стеклования. Стыковка ФЭУ и световода осуществлялась без оптического контакта.

Конструкция кожуха, в котором расположены ФЭУ и изогнутый конец световода-сместителя, позволяет заменять световод в произвольном модуле калориметра не разбирая всего детектора. Это может оказаться принципиальным при работе в высокоинтенсивных пучках из-за радиационных повреждений световода.

Для экранировки от рассеянных магнитных полей фотоумножитель размещался в стальном(труба диаметром 60 мм) и пермаллоевом экранах(3 слоя пермаллоя толщиной 200 мкм).

В центре первой пластины поглотителя каждого модуля предусматривалось отверстие, в которое устанавливался светодиод АЛ-307, сигнал от которого использовался для отслеживания временной нестабильности каналов электроники калориметра.

В третьей главе диссертации представлены результаты исследований характеристик адронного "сэмплинг"-калориметра с ячейкой 150×150 мм². Измерения проводились при облучении сборки из 16-ти модулей адронного калориметра пучком отрицательных π -мезонов. На Рис.2 показано распределение по амплитуде адронного сигнала А при попадании пучка в один из центральных модулей. В результате аппроксимации получено значение энергетического разрешения $R=13,7\%$. Нижняя кривая показывает амплитудный спектр при значительном увеличении порога дискриминации счетчика, регистрирующего не взаимодействовавшие π -мезоны и не поглощенные в калориметре частицы ливня. При этом происходит падение статистики примерно на 40% и улучшение разрешения до 10,1%. Это связано с тем, что в выборке увеличивается доля ливней с первой точкой взаимодействия в начале калориметра. На рисунке также приведен мюонный спектр.

Была исследована зависимость энергетического и пространственного разрешения от точки попадания адрона в ячейку. Результаты приведены на Рис.3 и 4. Точка отсчета проходит через стык модулей. Наблюдается ухудшение

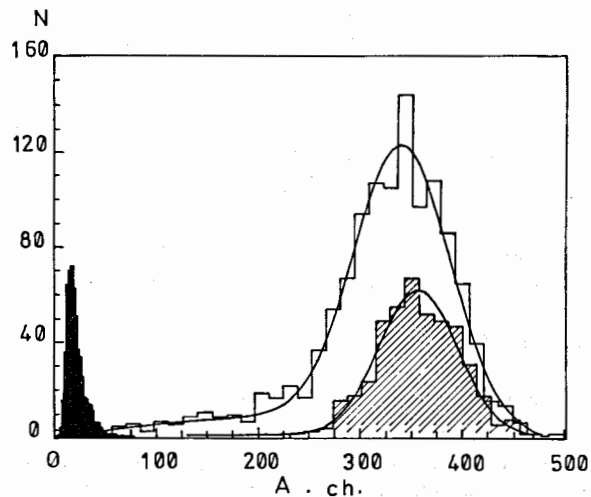


Рис.2. Амплитудные спектры с адронного калориметра:

- незаштрихованная гистограмма-спектр π -мезонов,
- заштрихованная гистограмма-спектр π -мезонов при значительном увеличении порога дискриминации,
- сплошная штриховка-мюонный спектр.

разрешения от центра к краю модуля с 13% до 18%. Зависимость координатного разрешения представлена для двух случаев: в первом-коррекция координат после их вычисления по центру тяжести ливня не производится, во втором-производится. Усредненное значение величины координатного разрешения составило 1,7 см. Полученные значения энергетического и пространственного разрешений 13,7% и 1,7 мм соответственно при энергии π -мезонов 37,5 Гэв позволяют сделать вывод о высокой перспективности калориметра данной конструкции. Также годоскопическая структура калориметра позволила получить данные о поперечном профиле адронного ливня.

Конструктивные особенности созданных модулей АК-600 позволили впервые измерить прямой вклад черенковского излучения, развивающегося в световоде-сместителе спектра, в энергетическое разрешение калориметра. На Рис.5 представлена зависимость энергетического разрешения 12-ти модульной матричной сборки от точки попадания адронов в счетчик размером $15 \times 15 \text{ см}^2$. Точка отсчета проходит через стык модулей. Наблюдается ухудшение разрешения от центра к краю модуля с 12 до 17% в области 2 см между осью ливня и сместителем спектра. Этот эффект может быть объяснен, в основном, вкладом

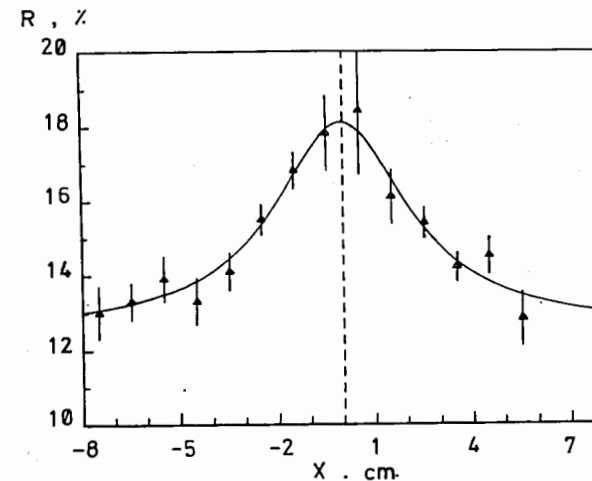


Рис.3. Зависимость энергетического разрешения калориметра от координаты регистрируемой частицы.

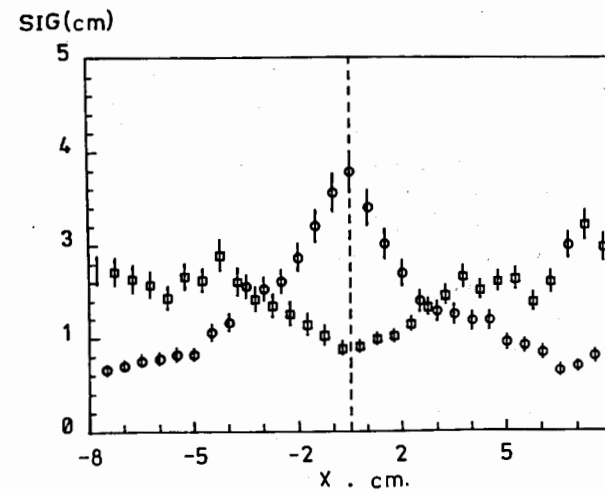


Рис.4. Зависимость координатной точности σ_x от координаты попадания π -мезона в калориметр.

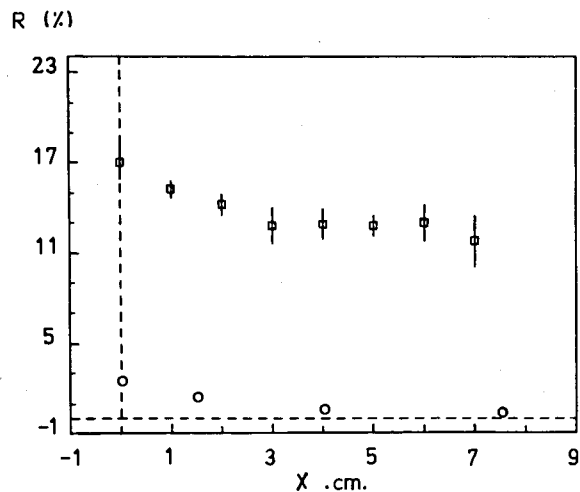


Рис.5. Зависимость энергетического разрешения калориметра от координаты регистрируемой частицы. Нижние точки-вклад черенковского излучения в энергетическое разрешение.

черенковского излучения от частиц, пересекающих световод-смещитель спектра, неоднородностью светособирания спинтиллятора и наличием щелей на стыках модулей. Чтобы разделить эти эффекты, между спинтилляторами и световодом одного из центральных модулей была проложена черная бумага. При этом спинтилляционный свет не попадает в смещитель спектра, а условия для переизлучения черенковского света не изменяются. Измерения проводились для четырех положений пучка по X -координате. Нижние точки на Рис.5 иллюстрируют вклад черенковского излучения в общее разрешение калориметра. Максимальный вклад составил 2,5% с уменьшением до 1% уже на расстоянии 2 см между осью ливня и световодом. Т.о. для размера ячейки $15 \times 15 \text{ см}^2$ можно сделать вывод, что наличие небольших "горячих" зон не окажет существенного влияния на характеристики детектора в целом.

Исследованы основные факторы, определяющие энергетическое разрешение адронного калориметра типа "сэндвич" и получены следующие значения для адрона с энергией 40 Гэв:

- флуктуации регистрируемой энергии -8,3%,
- флуктуации ядерных взаимодействий -5,5%,
- флуктуации продольного развития ливня и поглощения переизлученного света в световоде-смещителе спектра -7%,
- статистика фотоэлектронов -2,8%,
- флуктуации черенковского света от пересекающих световод частиц адронного ливня -6%.

Сумма перечисленных вкладов составила 12,5% в центре и 14% на краю модуля. Экспериментальные значения энергетического разрешения составили соответственно 12,4 и 18%.

Представлены результаты исследований влияния на разрешение детектора прозрачности спектросмещающего световода и флуктуаций продольного развития ядерного каскада. Показано, что можно улучшить энергетическое разрешение путем компенсации эффекта вытекания ливня в продольном направлении за счет оптимизации длины затухания спектросмещающего световода. На Рис.6 представлены результаты исследований, полученные моделированием методом Монте-Карло (кривые 1-3) и полученные на пучке π -мезонов с энергией 40 Гэв.

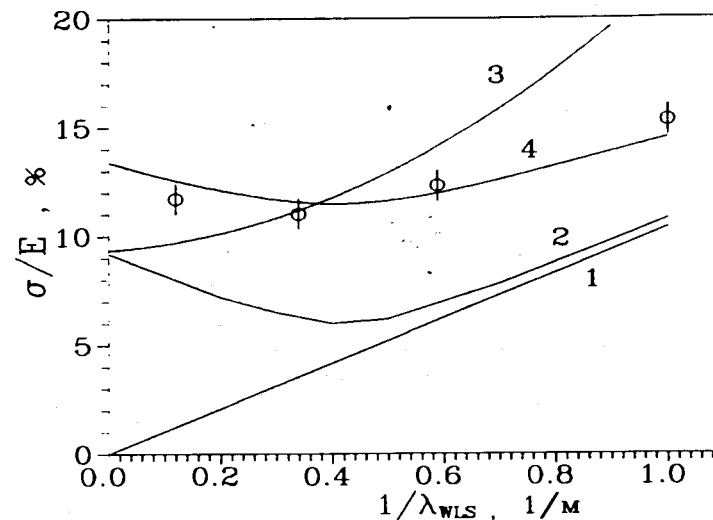


Рис.6. Зависимость разрешения калориметра от λ_{WLS}^{-1} :

-экспериментальные данные (π -мезоны 40 Гэв), кривая 4-фит экспериментальных данных. Вычисленный вклад σ_{ch}/E в энергетическое разрешение калориметра: 1-полного поглощения, 2-имеющего толщину $4,7 t_0$, 3-то же, что и 2, но повернут на 180° .

В четвертой главе диссертации представлены результаты исследований характеристик матричной адронной сборки с ячейкой $75 \times 75 \text{ мм}^2$. На Рис.7 показан характерный спектр сигналов от адронов, проходящих через центральную часть модуля. Спектры фитировались распределением Гаусса при наличии фона. Энергетическое разрешение в зависимости от точки попадания пионного пучка в ячейку показано на Рис.8. Из него видно, что на стыке двух модулей, где нет световода, разрешение практически не меняется и равно в среднем 12%, а на стыке, содержащем световод, разрешение ухудшается примерно в 1,5-2 раза.

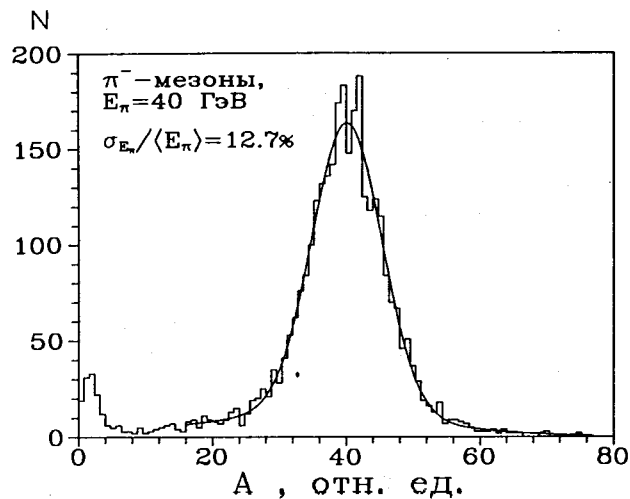


Рис.7. Амплитудный спектр сигналов A (сумма по всем модулям) от π^- -мезонов с энергией 40 Гэв. Сплошная кривая-фит экспериментальных данных. В начале шкалы-спектр от мюонов и не-взаимодействовавших адронов.

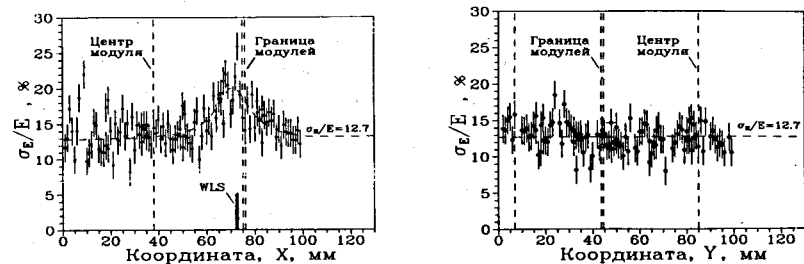


Рис.8. Зависимость энергетического разрешения σ_E/E калориметра от точки попадания пучка в ячейку.

Получена зависимость энергетического разрешения от энергии:

$$\sigma_E/E = (0.031 \pm 0.013) + (0.53 \pm 0.056) / \sqrt{E},$$

которая хорошо описывает полученные результаты при $E \leq 40$ Гэв.

Степень компенсированности калориметра исследовалась на пучке электронов с энергией 26.6 Гэв. На Рис.9 показан спектр сигналов от электронов,

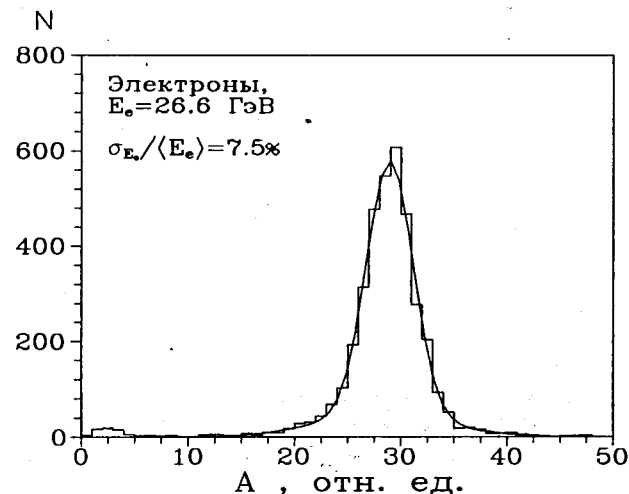


Рис.9. Амплитудный спектр сигналов A (сумма по всем модулям) от электронов с $E=26,6$ Гэв. Сплошная кривая-фит экспериментальных данных.

попадающих в центральный модуль матричной сборки. Форма спектра свидетельствует о чистоте используемого электронного пучка, т.е. о практически полном отсутствии адронного фона. Разрешение составило 7.5%, а отношение амплитуд сигналов электронного пучка и адронного $e/h=1.14$. Как следует из Рис.9, калориметр обладает довольно хорошим разрешением по энергии для электромагнитных ливней, энергетическая зависимость которого задается соотношением:

$$\sigma_E/E = (0.350 \pm 0.006) / \sqrt{E}.$$

На Рис.10 представлены данные по измерению координатной точности калориметра с ячейкой 75 мм в зависимости от координаты точки входа адрона. Величина разрешения в центре и на краю ячейки составляет 10 и 14 мм соответственно, а усредненное значение по всей площади равно $11,2 \pm 0,5$ мм. Эта величина в 1,5 раза меньше по сравнению с разрешением для ячейки 150 мм. Как видно из рисунка, наличие световода на стыке модулей практически не улучшает координатное разрешение. Также проведен анализ зависимости пространственного разрешения адронных калориметров модульного типа от размера ячейки и энергии адронов.

Исследована возможность разделения в адронном "сэмплинг"-калориметре ячеистого типа адронов и электронов с использованием распределения энерговыведения каскадов в поперечном направлении. Проведен анализ зависимости дисперсии профиля ливня и его формы от места положения

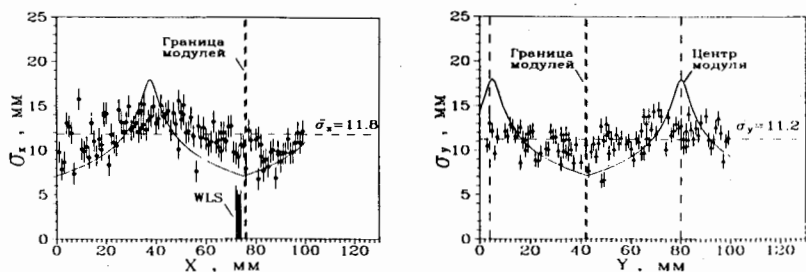


Рис.10. Зависимость координатной точности калориметра ($n=75$ мм) от координаты точки попадания адрона в ячейку:
а) $\sigma(X)$, б) $\sigma(Y)$. Кривые- расчет по формулам /11/.

оси ливня в ячейке и ее размера, сорта и энергии частиц. Введение ограничения на ширину ливня позволяет подавить регистрацию электронов до уровня порядка 10^{-2} при 90% эффективности регистрации π -мезонов. Такой же уровень достигается при подавлении адронов и выделении электронов.

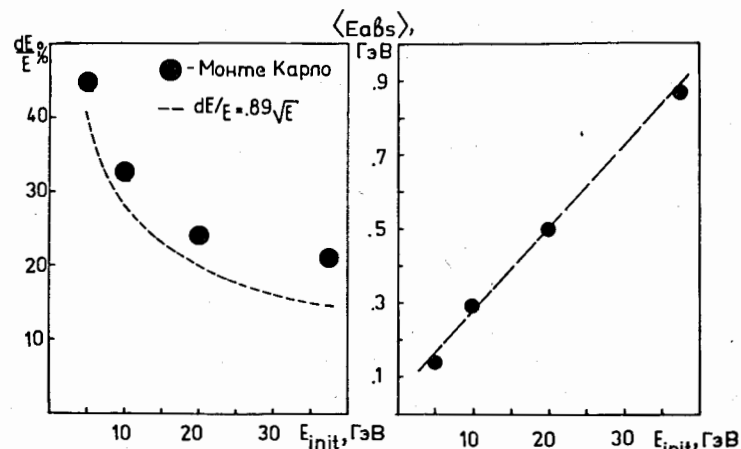


Рис.11. Зависимость энергетического разрешения калориметра от энергии первичных π -мезонов:
• - расчет методом Монте-Карло,
-- фит экспериментальных данных

Рис.12. Функция отклика калориметра в зависимости от энергий первичной частицы.

В пятой главе диссертации представлены результаты моделирования характеристик адронного калориметра с помощью программы "GHEISHA". Моделировалось развитие адронных ливней, инициированных заряженными π -мезонами в диапазоне энергий 5-40 ГэВ. Детектор представлял собой сборку, аналогичную АК-600, но сечением 2×2 м² и без центрального отверстия. Предварительные исследования показали, что такие размеры практически устраняют утечки ливня в поперечном направлении.

На Рис.11 представлены результаты моделирования зависимости энергетического разрешения калориметра от энергии первичных π -мезонов. Отличие предсказаний моделирования от фита экспериментальных данных составляет 5% при энергии первичных частиц 10 ГэВ.

На Рис.12 представлена зависимость детектируемой энергии ливня от импульса первичной частицы. Как и предполагалось, функция отклика калориметра в исследуемом диапазоне по энергии первичной частицы линейна.

Также приведены результаты исследования зависимости энергетического разрешения адронного калориметра от толщины активного слоя (сцинтиллятор 5 и 10 мм). Моделирование проводилось для пучков π -мезонов с энергией 10 ГэВ. Разрешение более "массивного" детектора лучше на 2-3%, его "длина"-5.25 ядерных длин вместо 4.97, что не является заметным улучшением характеристик калориметра.

В Заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Разработан и внедрен в промышленность способ изготовления сцинтилляторов методом литья под давлением на термопластавтоматах. Результаты испытаний показали, что полученные таким способом образцы не уступают по световыходу и однородности светособирания экструдированным и изготовленным путем механической обработки блочного сцинтиллятора, а по технологичности производства значительно их превосходят. Разработанная технология нашла широкое применение при производстве сцинтилляторов для установок НЕПТУН(УНК), ATLAS, WA-98(CERN), PHENIX, STAR(BNL).

2. Впервые детально и систематически проведены экспериментальные исследования основных характеристик детектора типа "сэндвич" сталь-сцинтиллятор со световодом-смесителем спектра с 75- и 150-мм ячейками в диапазоне энергий 5-40 ГэВ. Исследованы основные вклады в энергетическое разрешение адронного калориметра и проведено сравнение экспериментальных данных с расчетными.

3. Впервые измерен прямой вклад черенковского излучения, развивающегося в световоде-смесителе спектра, в энергетическое разрешение адронного калориметра и получена зависимость величины излучения от координаты попадания частицы в детектор.

4. Впервые исследовано влияние прозрачности спектросмещающего световода и флуктуаций продольного развития ядерного каскада на энергетическое разрешение адронного "сэмплинг"-калориметра. Показано, что разработанная

методика оптимизации длины затухания переизлученного света в световоде позволяет компенсировать вытекание энергии в продольном направлении и тем самым получать предельно допустимое разрешение для калориметров неполного поглощения в заданном диапазоне энергий. Это будет особенно существенно в Тэв-ной области энергий при создании коллайдерных установок.

5. Проведен анализ зависимости пространственного разрешения адронных калориметров модульного типа от размера ячейки и энергии частиц.

6. Исследован профиль адронного ливня, регистрируемого в ячеистом калориметре. Проведен анализ зависимости дисперсии профиля ливня и его формы от места положения оси ливня в ячейке и ее размера, от сорта и энергии частиц.

7. Исследована возможность разделения в адронном "сэмплинг"-калориметре ячеистого типа электронов и адронов с использованием информации о распределении энерговыделения каскадов в поперечном направлении

8. Проведено моделирование характеристик адронного калориметра с помощью программы "GHEISHA". Получена зависимость энергетического разрешения от энергии первичной частицы и толщины активного слоя. Проведен тест на линейность в интервале энергий 5-40 Гэв.

Описанные в представленной диссертации модули адронного калориметра нашли практическое использование при исследовании экзотических состояний в адронных взаимодействиях и при изучении свойств составных ячеистых сэмплинг-калориметров на установке МИС ИТЭФ, в системе мониторинга пучка эксперимента ЭКСЧАРМ. В настоящее время созданные модули адронного калориметра предполагается использовать в установке COMPASS(CERN).

Диссертация написана на основании следующих опубликованных работ:

1. Алеев А.Н.,...Кадыков М.Г. и др., Препринт ОИЯИ Р1-89-434, Дубна, 1989, ПТЭ №5, 1990, стр.60-63.
2. Кадыков М.Г. и др., Препринт ОИЯИ Р1-89-769, Дубна, 1989, ПТЭ №4, 1991, стр.43-46.
3. Гавришук О.П.,...Кадыков М.Г. и др., Препринт ОИЯИ Р1-90-227, Дубна, 1990, ПТЭ №3, 1991, стр.33-36.
4. Гавришук О.П.,...Кадыков М.Г. и др., Препринт ОИЯИ Р1-90-295, Дубна, 1990, ПТЭ №3, 1991, стр.36-39.
5. Кадыков М.Г. и др., Препринт ОИЯИ Р13-90-16, Дубна, 1990, ПТЭ №1, 1991, стр.85-87.
6. Кадыков М.Г., Семенов В.К., Сообщение ОИЯИ Р1-91-36, Дубна, 1991.
7. Гавришук О.П.,...Кадыков М.Г. и др., Препринт ОИЯИ Р1-91-537, Дубна, 1991, ПТЭ №3, 1993, стр.37-42.
8. Гавришук О.П.,...Кадыков М.Г. и др., Препринт ОИЯИ Р1-91-538, Дубна, 1991, ПТЭ №4, 1993, стр.43-48.
9. Гавришук О.П.,...Кадыков М.Г. и др., Препринт ОИЯИ Р1-91-554, Дубна, 1991, ПТЭ №3, 1994, стр.35-42.

10. Gavrishchuk O.P.,...Kadykov M.G. et al., Preprint JINR E1-92-101, Dubna, 1992, submitted to NIM.

11. Гавришук О.П.,...Кадыков М.Г. и др., Препринт ОИЯИ Р193-120, Дубна, 1993.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 ноября 1997 года.