



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

95-431

P13-95-431

С.В.Афанасьев, Е.В.Игорова, В.И.Колесников,
А.И.Малахов, Д.П.Толкачёв

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ
КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ
С УЛУЧШЕННЫМ КООРДИНАТНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

1995

1. Введение

Одна из проблем, возникающих при изготовлении многоканального детектора полного поглощения, — это потери части электромагнитного ливня в местах состыковки соседних модулей. Особенно это актуально для блоков типа "сэндвич". Ухудшение однородности сигнала по площади может достигать у них десятков процентов. В своей работе мы постарались решить эту проблему, отказавшись от модульной конструкции детектора и тем самым полностью исключив межблочные щели. В основу прибора заложена идея использовать естественное загущение света внутри сцинтиллятора для локализации места прохождения частиц.

2. Описание модуля

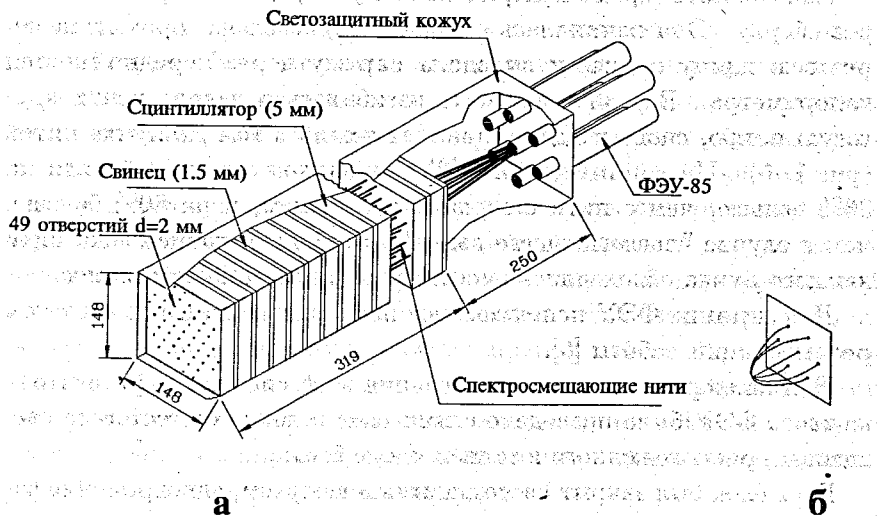


Рис. 1: а — общий вид модуля; б — схема расположения нитей на переднем торце блока

Исследуемый блок типа "пашлык" [1, 2] был изготовлен из 48 свинцовых и 48 сцинтилляционных пластин размером $1.5 \times 147 \times 147$ и $5 \times 147 \times 147$ мм соответственно. Схематический вид модуля представлен на рис.1. Сцинтиллятор был изготовлен на основе полисти-

рола с добавлением 2% р-терфина и 0.02% РОРОР [3]. Между пластинами были помещены тонкие листы белой бумаги, рассеивающие свет. В пластинах было просверлено 49 отверстий диаметром 2 мм, расположенных в гексагональном порядке. Суммарная толщина собранного пакета составила 13.4 радиационных длин, что обеспечивает поглощение более 98% энергии ливня, образующегося в объеме детектора от электрона с энергией 1 ГэВ.

В просверленные отверстия были пропущены спектросмещающие волокна диаметром 1.5 мм. Волокна были сгруппированы в 7 пучков по 7 штук. Каждый пучок был состыкован с отдельным фотоэлектронным умножителем ФЭУ-85 [4, 5], расположенным в задней части блока. На рис.1 показано одно из семи таких соединений. Расстояние между ближайшими ФЭУ равно 50 мм.

Каждая нить (кроме центральной в пучке) дважды проходила через сборку. Она начиналась с заднего торца блока, проходила через всю длину модуля и выходила наружу через передний торец калориметра. В этой точке нить изгибалась и делала почти круговую петлю, снова входя в канал, лежащий в том же пучке нитей (рис.1, б). По данным работы [2] световыход с загнутой нити на 30% больше, чем с нити с зеркальным концом, и на 80% больше, чем в случае "поглощающего конца". На заднем конце блока нити каждого пучка склеивались вместе, обрезались и полировались.

Для питания ФЭУ использовался паспортный делитель с учетом рекомендации работы [6].

Для калибровки и мониторинга всей системы к фотокатоду каждого ФЭУ было подведено оптическое волокно от тестового светодиода, расположенного в задней части блока.

Весь блок был закрыт светозащитным кожухом, одновременно защищавшим нити от случайного повреждения.

Нужная жесткость сборки обеспечивалась четырьмя 6-мм металлическими стержнями, пропущенными через сборку на расстоянии 5 мм от углов блока.

3. Принцип работы блока

Попадающая в блок частица в зависимости от ее типа либо вызывает ливень, либо проходит через вещество блока, теряя энергию на ионизацию. В случае образования ливня его вершину для типичной

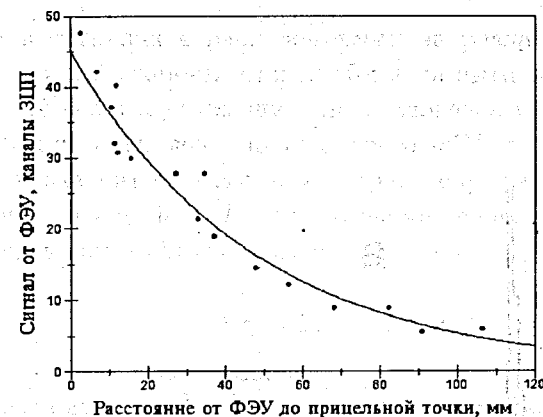


Рис. 2. Зависимость сигнала с ФЭУ от расстояния до прицельной точки. Кривая – результат аппроксимации экспонентой $45 \cdot \exp(-x/47)$

блочной структуры можно восстановить с точностью до нескольких миллиметров. В то же время для минимально ионизирующей частицы координата определяется в большинстве случаев геометрическими размерами отдельного модуля. Нами была предпринята попытка устранить этот недостаток, отказавшись от блочного разбиения и используя естественное затухание света внутри сцинтиллятора для локализации места прохождения частицы внутри детектирующего блока. Рассмотрим прохождение через сборку заряженной частицы. Если отвлечься от многократного кулоновского рассеяния, траекторию частицы можно считать прямой. Свет, образующийся вдоль трека, затухает по закону, близкому к экспоненциальному (рис.2). Поэтому, если расположить светоприемники равномерно по площади, то, аппроксимируя полученные с них сигналы, можно локализовать трек с хорошей точностью.

Таким образом, чем ближе расположен к месту прохождения частицы фотоприемник, тем больше будет сигнал. На рис.2 представлена экспериментальная зависимость сигнала на ФЭУ от расстояния от его центра до точки попадания частицы (частицы дейтроны с импульсом 3 ГэВ/с).

Координатное разрешение (точность восстановления координат точки попадания в детектор) зависит от постоянной затухания света в сцинтилляторе λ : чем сильнее затухает свет, тем больше будет

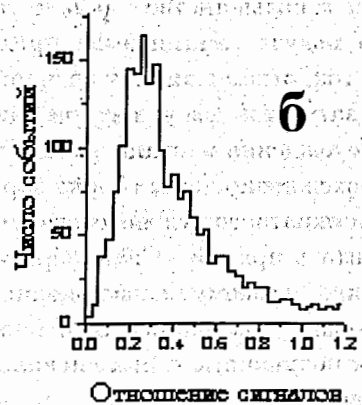
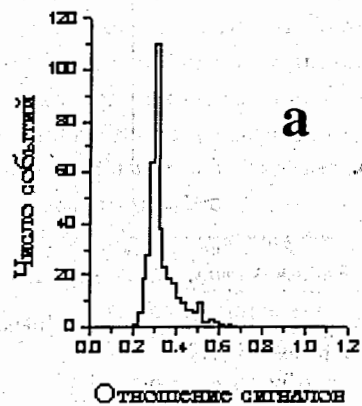


Рис. 3. Распределение для отношения сигнала с одного из нецентральных ФЭУ к сигналу с центрального ФЭУ для результата моделирования (а) и экспериментальных данных (б)

разница в сигналах с расположенных на различных расстояниях ФЭУ. С другой стороны, при малых λ на нити собирается меньше света, и это ведет к ухудшению энергетического разрешения блока.

Отношение сигналов с центрального ФЭУ к сигналам ближайших ФЭУ зависит от двух параметров: параметра затухания λ и расстояния между ФЭУ l . Оптимальные значения λ и l определяются следующими выражениями:

$$\lambda \leq R_M, \quad l \leq \lambda, \quad (1)$$

где R_M – мольтеровский радиус.

В таком случае $\frac{A}{A_{central}} \approx 1$ для электромагнитного ливня и $\frac{A}{A_{central}} < 1$ для адронов.

С помощью сигналов с близлежащих ФЭУ можно восстанавливать координаты ионизирующей частицы (адрона), попавшей в блок, гораздо точнее, чем это можно сделать с помощью обычной схемы "один блок – один ФЭУ", координатное разрешение которой можно оценить как половину поперечного размера блока. Для такого координатного восстановления можно использовать метод центра тяжести и его модификации.

Кроме того, по сигналам с близлежащих к точке попадания ФЭУ можно разделять события, связанные с прохождением через блок отдельного адрона, и события, связанные с электромагнитным ливнем. В случае ливня "размытие сигнала" будет больше.

При помощи пакета GEANT было промоделировано прохождение дейтронов с импульсом 3 ГэВ/с через блок; при этом частица проходила через центральную часть блока. На рис.3 представлены распределения отношения сигнала с одного из нецентральных ФЭУ к сигналу с центрального ФЭУ для результатов моделирования и экспериментальных данных. Несмотря на то, что моделирование не учитывало многих важных эффектов (не учитывались эффекты, связанные с распространением света в оптоволоконках, и флуктуации, связанные с ФЭУ и электроникой), отметим совпадение положений пиков.

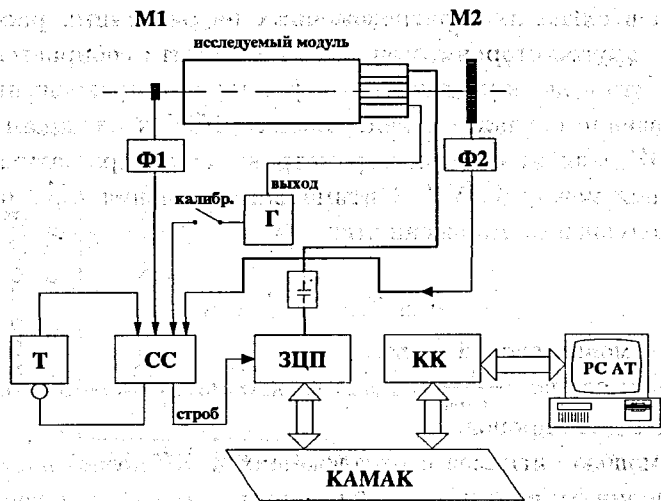


Рис. 4. Блок-схема эксперимента

4. Схема эксперимента

Модуль исследовался на пучках дейтронов с импульсом 3 ГэВ/с и α -частиц с импульсом 8 ГэВ/с. Схема эксперимента представлена на рис.4. Пучок мониторировался сцинтилляционными счетчиками M1 и M2 с размером чувствительной области 10x10 и 40x40 мм в случае дейтронов и 10x10 и 20x20 мм, соответственно, при измерениях на α -частицах. Счетчик M1 располагался в непосредственной близости от торца исследуемого модуля и определял место попадания частиц в детектор (прицельную точку). Модуль был установлен на платформе, позволявшей перемещать его в вертикальном и поперечном направлениях относительно оси пучка.

Сигнал с мониторов через формирователи Ф1 и Ф2 попадал на схему совпадений СС, сигнал с которой служил триггером для запуска электроники. Таймер Т блокировал систему совпадений на время, необходимое для считывания информации с ЗЦП. Для преобразования сигналов использовался зарядово-цифровой преобразователь 83ЦП-393 [7]. Информация считывалась через контроллер крейта КАМАК КК-012 и записывалась в ПЭВМ типа IBM PC для последующей обработки.

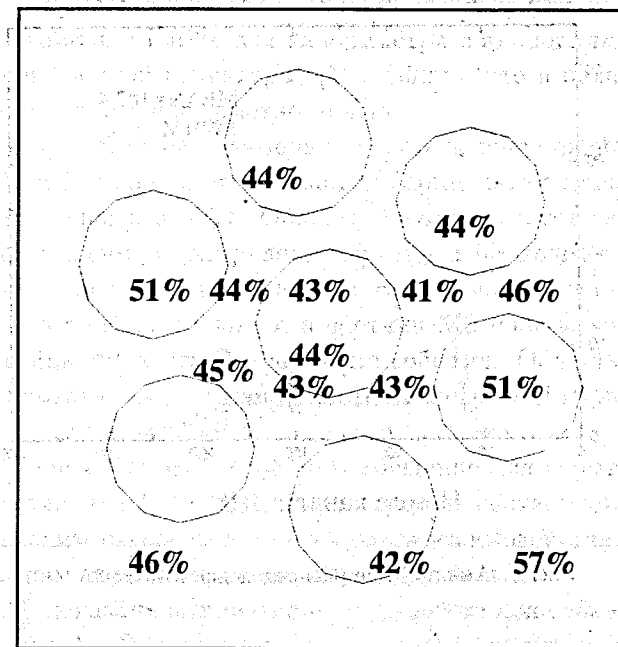


Рис. 5. Полученное амплитудное разрешение для различных точек. Положение чисел соответствует положению прицельных точек, т. е. мест входа частиц в блок

5. Амплитудное разрешение

На пучке были сняты данные для 15 прицельных точек в случае дейтронов с импульсом 3 ГэВ/с и 2 прицельных точек в случае α -частиц с импульсом 8 ГэВ/с. Прицельная точка задавалась положением монитора M1. На рис.5 приведены полученные значения амплитудного разрешения для дейтронов. Они позволяют оценить степень однородности сборки по амплитудному разрешению. Среднее по площади центральной области блока амплитудное разрешение равно $43 \pm 1\%$.

Амплитудное разрешение для случая дейтронов, характерное для центральной области радиусом 30-40 мм, представлено на рис.6. Вне этой области нарушается однородность системы и параметры ухудшаются.

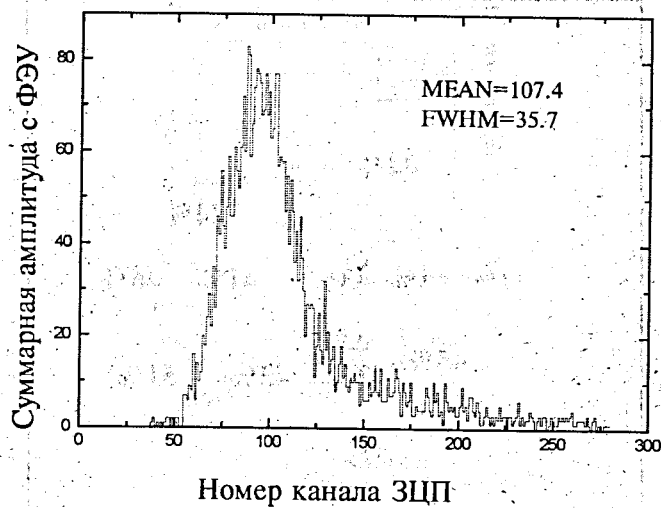


Рис. 6. Амплитудное распределение в точке 15

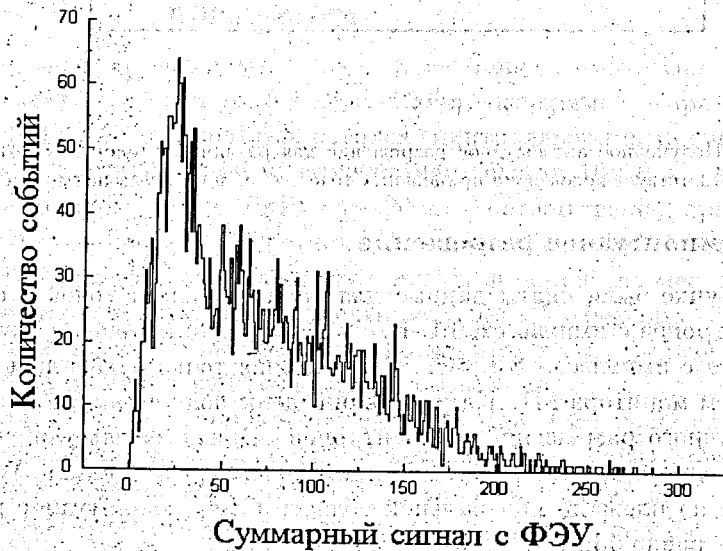


Рис. 7. Амплитудное распределение для калориметрического блока аналогичного строения, но сделанного по одноблочной схеме. Частицы - дейтроны 9 ГэВ/с

На рис. 7 представлено для сравнения амплитудное распределение для дейтронов 9 ГэВ/с для калориметра с аналогичным строением, но одноблочной структуры [1]. Видно, что в нашем случае амплитудное разрешение заметно лучше.

На рис.8 представлено двумерное распределение сигналов с мониторов М1 и М2 для случая α -частиц (прицельная точка лежит в центральной области блока). Область А соответствует случаю, когда в блок попадает двухзарядная частица и проходит через блок без ядерного взаимодействия. Область Б - случай, когда α -частица провзаимодействовала в блоке и в счетчик М2 попала уже однозарядная частица. Область В - шумовые события. Область Г можно интерпретировать как попадание частицы в световод первого монитора.

На рис.9 показано амплитудное разрешение для событий, лежащих в областях А и Б. Узкий пик на графике соответствует частицам, прошедшим сквозь блок без ядерного взаимодействия. Широкий - частицам, испытавшим такое взаимодействие.

На рис.10 показано амплитудное разрешение для событий, лежащих в области А. Отметим, что пик на рис.10 практически совпадает с узким пиком на рис.9.

К сожалению, у нас не было возможности испытать блок на электронном пучке. Однако, сравнивая полученные нами для дейтронов результаты с данными работы [1], в которой описывается блок, сходный по строению, но сделанный по схеме "один блок - один ФЭУ", можно ожидать, что и в случае электронов параметры нашего блока будут, по крайней мере, не хуже. Блок, описанный в работе [1], имел разрешение $13.4\%/\sqrt{E}$ (ГэВ).

6. Координатное разрешение блока

Наиболее простой метод восстановления координат точки попадания частицы - метод центра тяжести, но в нашем случае он дает большую систематическую ошибку: восстановленные точки оказываются смещенными к центру блока. Наилучшие результаты из примененных методов [8] получились при использовании модифицированного метода центра тяжести, учитывающего экспоненциальное затухание света в пластике. Т.к. ФЭУ расположены в гексагональном порядке, то была выбрана косоугольная система координат, оси

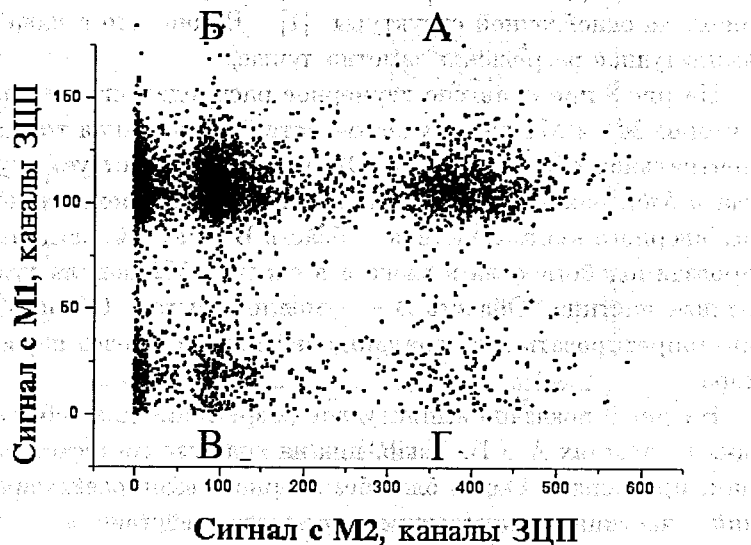


Рис. 8. Двухмерное распределение сигналов с мониторов

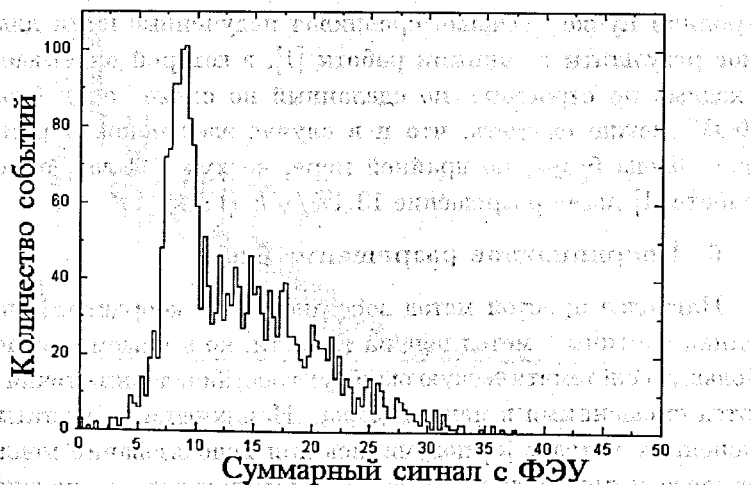


Рис. 9. Амплитудное распределение для событий, лежащих в областях А и Б. Сигнал разделен на число ФЭУ

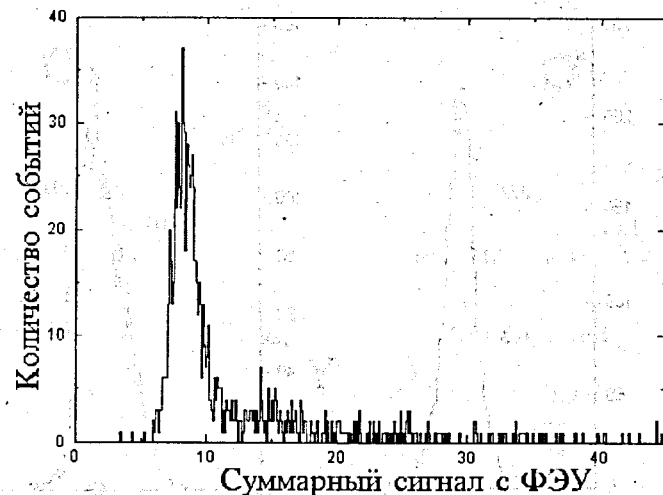


Рис. 10. Амплитудное распределение для событий, лежащих в области А. Сигнал разделен на число ФЭУ

которой совпадают с направлением ряда ФЭУ (рис.12).

Координаты восстанавливались следующим образом:

$$x_c = \frac{\sum_i x_i A_i \exp^{-\frac{L_i}{L_0}}}{\sum_i A_i}, \quad y_c = \frac{\sum_i y_i A_i \exp^{-\frac{L_i}{L_0}}}{\sum_i A_i} \quad (2)$$

где L_0 — длина затухания света (в данном случае она равна 47 мм),

x_i — координата i -го ФЭУ,

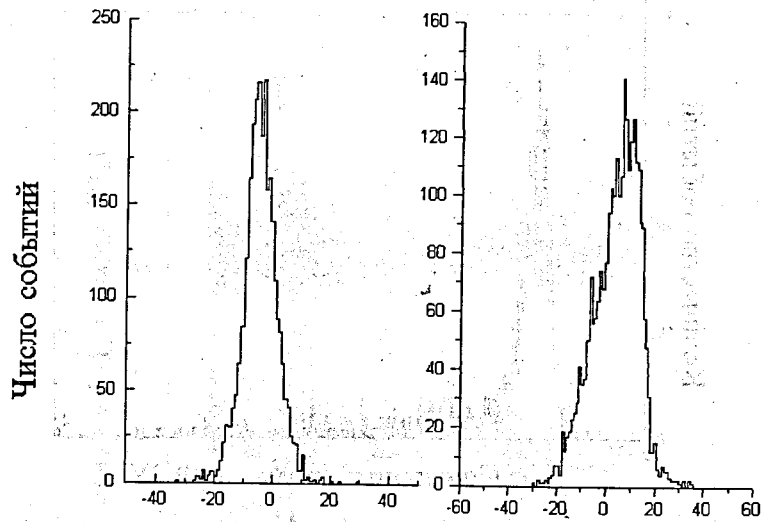
A_i — сигнал с i -го ФЭУ.

Суммирование идет по ФЭУ, расположенным вдоль соответствующей оси.

L_i — расстояние между i -м ФЭУ и предполагаемой точкой попадания частицы, вычисляемой обычным методом центра тяжести.

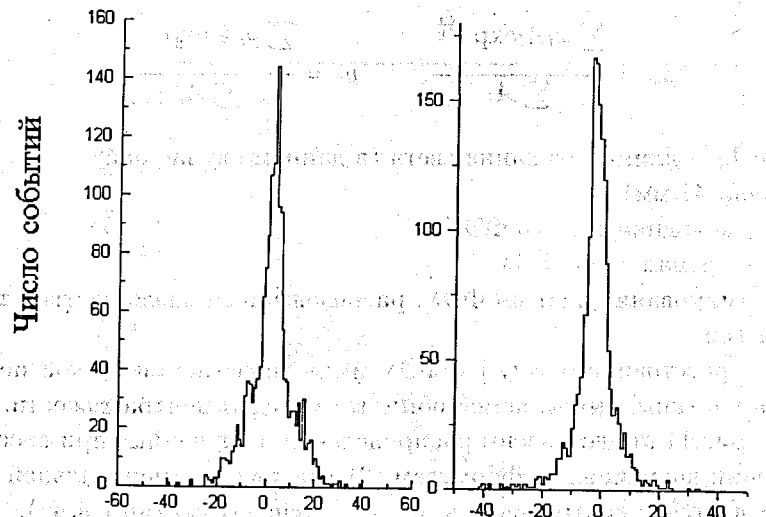
На рис.11 представлены распределения, полученные при восстановлении координат по формулам (2) для точек из центральной области в случае дейтронов (а, б) и в случае α -частиц (в, г).

На рис.12 представлены полученные значения координатного разрешения и систематического смещения (восстановленные точки ока-



а

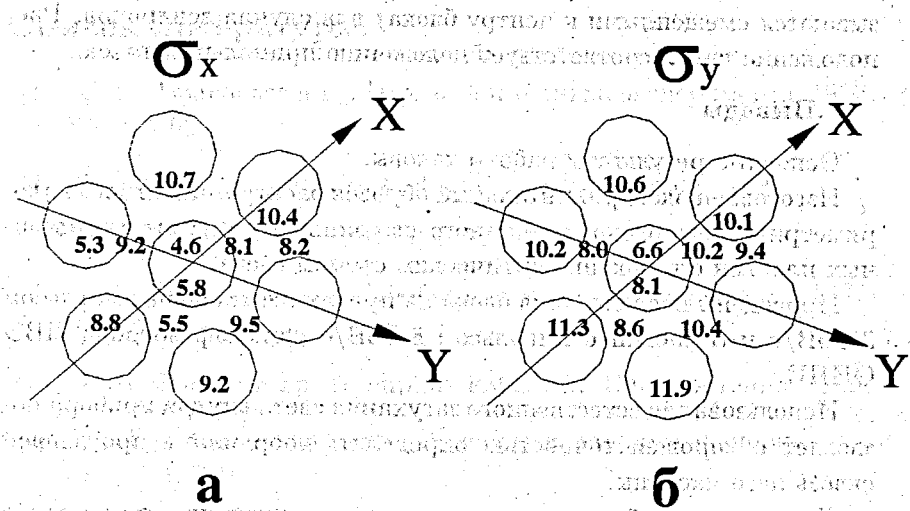
б



в

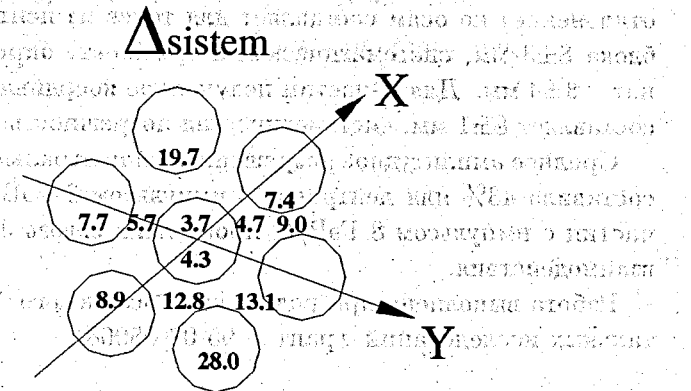
г

Рис. 11. Распределения для восстановленных координат для случая дейтронов (а, б) и для случая α -частиц (в, г)



а

б



в

Рис. 12. Полученные значения координатного разрешения (стандартного отклонения) (рис.а, б) и систематической погрешности для случая дейтронов (рис.в). Рис.а показывает координатное разрешение по x-координате, рис.б – по y-координате. Расположение чисел соответствует положению прицельных точек. Результаты даны в мм

зываются смещенными к центру блока) для случая дейтронов. Расположение чисел соответствует положению прицельных точек.

7. Выводы

Основные результаты работы таковы.

Изготовлен экспериментальный образец электромагнитного калориметрического блока, собранного из свинцовых и сцинтилляционных пластин с волоконно-оптическим съемом света.

Проведены исследования блока на пучках дейтронов с импульсом 3 ГэВ/с и α -частиц с импульсом 8 ГэВ/с синхрофазотрона ЛВЭ ОИЯИ.

Использование естественного затухания света внутри прибора позволяет с хорошей точностью определять координаты прошедшей сквозь него частицы.

Для случая дейтронов координатное разрешение (стандартное отклонение) по осям составляет для точек из центральной области блока 8 ± 3 мм, систематическая погрешность определения координат — 8 ± 4 мм. Для α -частиц полученное координатное разрешение составляет 8 ± 1 мм, систематическая погрешность — 8 ± 4 мм.

Среднее амплитудное разрешение для центральной области блока составило 43% для дейтронов с импульсом 3 ГэВ/с и 21% для α -частиц с импульсом 8 ГэВ/с, прошедших сквозь блок без ядерного взаимодействия.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант N 95-02-05068.

Список литературы.

- [1] . С. В. Афанасьев и др. Приборы и техника эксперимента. 1992, N5, стр 63.
- [2] . G.S. Atoyán et. al. Preprint INR-736/91, Moscow, 1991.
- [3] . А. Н. Алеев и др., ОИЯИ, P1-89-434, Дубна, 1989.
- [4] . В. Н. Евдокимов и др. Приборы и техника эксперимента. 1987, N4, 151.
- [5] . Г. В. Фостер и др. Препринт ИФВЭ 92-136, Протвино, 1992.
- [6] . В. Г. Бондаренко и др. Приборы и техника эксперимента. 1975, N4, 160.
- [7] . С. Г. Басиладзе, ОИЯИ, I3-80-857, Дубна, 1980.
- [8] . L. Bugge. Nucl. Instr. and Meth., A-242 (1986), 228

Рукопись поступила в издательский отдел
16 октября 1995 года.