

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ И СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧЕРЕНКОВСКОГО γ -СПЕКТРОМЕТРА

И. В. ГЛАВНАКОВ, В. И. КРЫШКИН, В. Н. СТИБУНОВ,
В. Н. ЕПОНЕШНИКОВ

(Представлена научно-техническим семинаром лаборатории
высоких энергий НИИ ЯФ)

Основным требованием, предъявляемым к черенковским спектрометрам полного поглощения, является высокое энергетическое и временное разрешение. Решение этой задачи возможно двумя способами: а) путем использования в приборе двух типов ФЭУ, один из которых обладает хорошими спектрометрическими характеристиками, другой — временными; б) использование ФЭУ, обладающего удовлетворительными как спектрометрическими, так и временными характеристиками.

Целью данной работы является исследование временных и спектрометрических характеристик черенковских γ -спектрометров полного поглощения в диапазоне энергий γ -квантов 200—700 МэВ. Были проведены исследования характеристик 3 вариантов γ -спектрометров с различными типами фотоэлектронных умножителей. В первом варианте спектрометра использовался один спектрометрический фотоэлектронный умножитель типа ФЭУ-49 и два временных типа ФЭУ-36, во втором — один фотоэлектронный умножитель типа ФЭУ-65, в третьем — один ФЭУ-49. Ниже описываются характеристики и конструкции спектрометров с различными типами ФЭУ.

1. γ -спектрометр с двумя типами ФЭУ

Конструкция спектрометра с разделением временных и спектрометрических функций приведена на рис. 1. Радиатор спектрометра состоит из двух блоков стекла ТФ-1: цилиндрического диаметром 340 мм и высотой 100 мм и конического с основаниями диаметром 340 и 300 мм, высотой 200 мм, склеенных клеем ОК-72. Боковая поверхность радиатора полирована и покрыта алюминиевым рефлексом. Передний торец покрыт алюминизированным майларом. Радиатор и фотоэлектронные умножители помещены в составную цилиндрическую оправу из мягкой стали. Оптический контакт радиатора с умножителем осуществляется силиконовой смазкой. Фиксация положения умножителей на торце радиатора достигается с помощью специальной системы мягкого поджатия. Для устранения взаимных электромагнитных наводок баллоны умножителей помещены в цилиндры из медной фольги.

Спектрометрический канал прибора состоит из умножителя ФЭУ-49 на торце радиатора, эмиттерного повторителя, линейного пропускателя с регулируемой шириной «ворот» и анализатора импульсов АИ-256. Временной канал включает в себя два ФЭУ-36, сумматор и формиро-

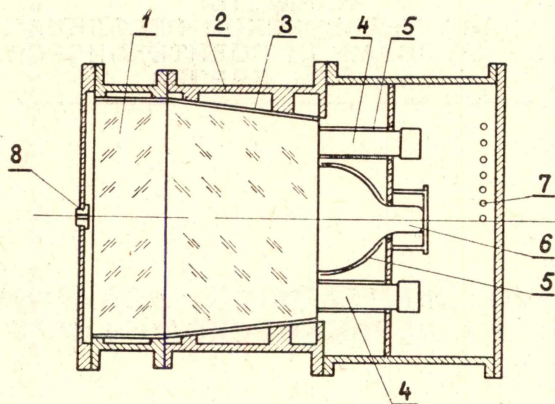


Рис. 1. Конструкция черенковского спектрометра. 1 — радиатор, 2 — корпус, 3 — отражатели, 4 — ФЭУ-36, 5 — электромагнитный экран, 6 — ФЭУ-49, 7 — высокочастотные разъемы.

ватель стандартных импульсов с порогом 0,25 В. Суммирование импульсов двух ФЭУ производилось на активном сопротивлении.

2. Фотоэлектронные умножители

Один экземпляр ФЭУ-49 был выбран по лучшей однородности фотокатода и лучшему собственному амплитудному разрешению, которые исследовались с кристаллом NaI и источником Co^{60} . Как при выборе ФЭУ, так и в спектрометре питание ФЭУ-49 осуществлялось стандартным делителем напряжения.

Основными требованиями, предъявляемыми к умножителям ФЭУ-36, являются высокая чувствительность фотокатода и низкий уровень шумов. Предварительный отбор ФЭУ-36 делался с пластическим сцинтиллятором и источником Co^{60} на специальном стенде, позволяющем изменять первые и последние три сопротивления делителя напряжения. Окончательное определение параметров оптимального делителя напряжения осуществлялось с использованием GaP источника света. Причем интенсивность света соответствовала вырыванию нескольких электронов из фотокатода ФЭУ. Напряжение питания ФЭУ выбиралось на плато счетной характеристики, которая получалась при предельно слабой засветке фотокатода.

3. Калибровка спектрометра

Коллимированный пучок тормозного излучения от внутренней мишени синхротрона, пройдя очистительный магнит, конвертировался в электронно-позитронные пары в мишени магнитного парного спектрометра (рис. 2). Отобранные магнитом по импульсу электроны коллимировались и попадали на передний торец γ -спектрометра. Разброс электронов по импульсу составлял $\pm 3\%$. В качестве монитора использовался телескоп из двух сцинтилляционных счетчиков, расположенных перед входным окном спектрометра.

На рис. 3 приведена зависимость амплитуды выходного импульса спектрометра от энергии регистрируемых электронов. Как видно из рисунка, эта характеристика линейна в исследованном диапазоне энергий.

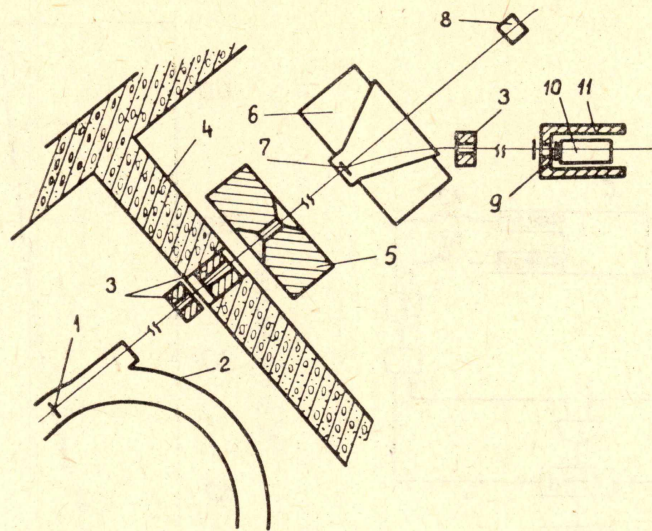


Рис. 2. Схема расположения аппаратуры. 1 — внутренняя мишень синхротрона, 2 — вакуумная камера синхротрона, 3 — свинцовые коллиматоры, 4 — бетонная защита, 5 — очищающий магнит, 6 — магнитный парный спектрометр, 7 — мишень, 8 — квантометр, 9 — сцинтилляционный счетчик, 10 — черенковский γ -спектрометр, 11 — свинцовая защита.

Зависимость энергетического разрешения спектрометра от энергии электронов дана на рис. 4. Несколько худшее разрешение нашего прибора по сравнению со спектрометром [1], по-видимому, объясняется наличием склейки и геометрией радиатора. Была произведена калибровка спектрометра со свинцовым конвертором толщиной 8 мм, помещенным на расстоянии 4,5 см от радиатора. В исследованном диапазоне энергий амплитуда выходных импульсов уменьшилась на 15—20%, а разрешение ухудшилось на 2—3%.

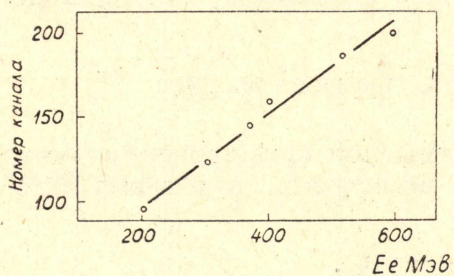


Рис. 3. Зависимость амплитуды импульса спектрометра от энергии электронов.

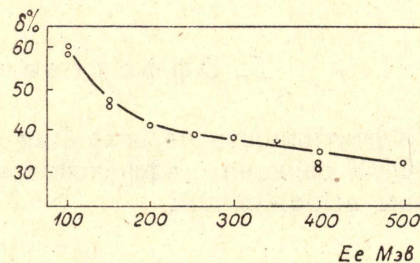


Рис. 4. Зависимость энергетического разрешения спектрометра от энергии электронов.

4. Временные характеристики

Временные характеристики спектрометра исследовались с помощью время-амплитудного конвертора (рис. 5). На рис. 6 показано типичное распределение временных интервалов между импульсами счетчиков S и C. Предварительно аналогичные распределения были получены с использованием в качестве «стартового» импульса импульсов отдельных ФЭУ-36, затем с помощью линий задержек максимумы вре-

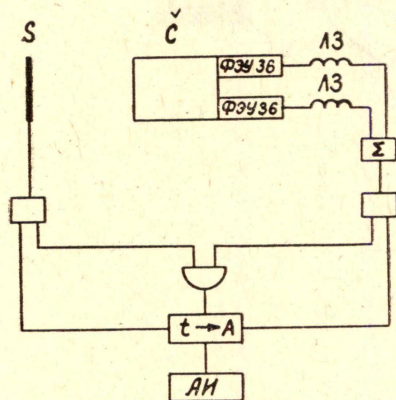


Рис. 5. Схема измерения временных характеристик спектрометра. Σ — сумматор, \square — формирователь, \sphericalangle — схема совпадений, $t \rightarrow A$ — время-амплитудный конвертор, АИ — амплитудный анализатор импульсов, ЛЗ — линии задержек, S — сцинтилляционный счетчик.

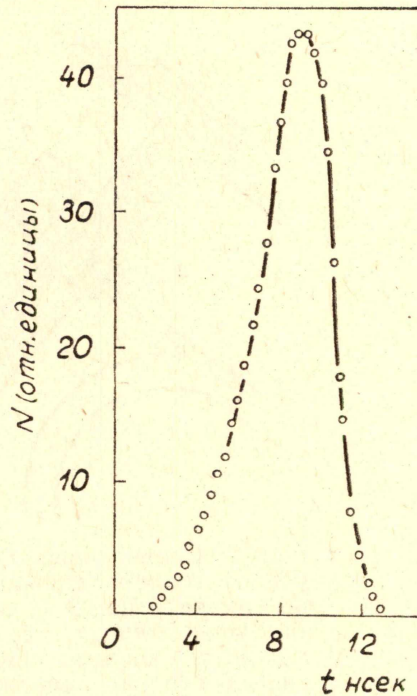


Рис. 6. Распределение интервалов времени между сигналами проходного сцинтилляционного счетчика и спектрометра.

временных распределений были совмещены с точностью $\pm 0,3$ н.с. Заметного сдвига максимума временного распределения при изменении энергии электронов не наблюдалось. Асимметрию временных распределений и относительно большую ширину их можно объяснить низкой интенсивностью света, достигающего фотокатодов ФЭУ-36, и блужданием света в радиаторе. Стабильность работы как временного канала, так и спектрометрического контролировалась с помощью GaP светодиодов.

5. Эффективность регистрации

Эффективность регистрации системы при суммировании импульсов двух ФЭУ связана с эффективностью регистрации отдельных ФЭУ следующим выражением:

$$\sigma_{\Sigma} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2,$$

то есть необходимым условием 100% эффективности является стопроцентная эффективность хотя бы одного умножителя, что в нашем случае трудно достижимо. Но практически разумная эффективность может быть получена и без удовлетворения этого условия. Оценку эффективности регистрации одного ФЭУ-36 можно получить из значения величины среднего числа фотоэлектронов, поступающих в умножающую систему ФЭУ [1], которая при энергии электронов 100 МэВ равна приблизительно 1,5. Это свидетельствует о принципиальной возможности, используя ФЭУ-36, регистрировать электроны и γ -кванты с энергией больше 100 МэВ.

Измерение эффективности регистрации спектрометра было сделано по схеме, изображенной на рис. 7. Эффективность рассчитывалась из отношения площадей спектров при управлении линейного пропускателя, либо от сцинтилляционного телескопа (СС1), либо от (СС2). За-

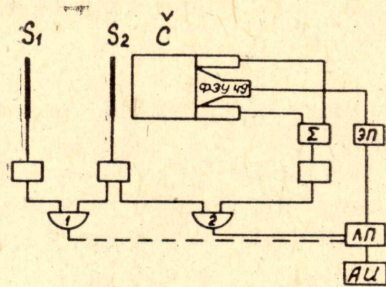


Рис. 7. Схема измерения эффективности регистрации спектрометра. Σ — сумматор, \square — формирователь, 1, 2 — схемы совпадений, ЭП — эмиттерный повторитель, ЛП — линейный пропускатель, АИ — амплитудный анализатор импульсов, S_1, S_2 — сцинтилляционные счетчики.

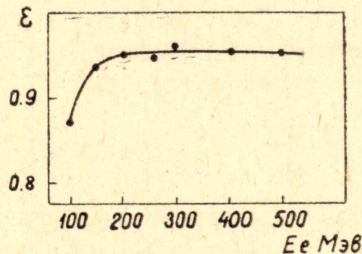


Рис. 8. Зависимость эффективности регистрации спектрометра от энергии электронов.

Зависимость эффективности регистрации спектрометра от энергии приведена на рис. 8. Заметно резкое уменьшение эффективности при энергии электронов ниже 100 МэВ, обусловленное относительно высоким порогом формирователя и слабой интенсивностью черенковского света. Снижение же порога формирователя приводит к значительному увеличению уровня шумов.

II. γ -спектрометр с ФЭУ-65

Из-за относительной новизны умножителя типа ФЭУ-65 была сделана предварительная оценка энергетического разрешения спектрометра и диапазона амплитуд импульсов с анода ФЭУ-65.

1. Оценка энергетического разрешения

Если предположить, что интенсивность свечения, испускаемого отдельной ливневой частицей, в среднем одинакова для всех частиц, то выражение для энергетического разрешения спектрометра будет иметь вид [2]

$$\delta^2 = \delta_1^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2,$$

где δ_1 — вклад в разрешение спектрометра флуктуаций числа ливневых частиц;

δ_3 — разброс, вносимый светосбором;

δ_4 — разброс, связанный с умножением фотоэлектронов.

Необходимую зависимость $\delta_1(E)$ для радиатора наших размеров (12 р. е.) можно получить интерполированием данных работы [2]. Из этой же работы следует, что при длине радиатора 12 радиационных единиц вклад в энергетическое разрешение флуктуаций светосбора слабо зависит от энергии первоначального γ -кванта, и его можно принять равным 7%. Осталось учесть вклад в разрешение флуктуации коэффициента усиления ФЭУ δ_4 . Исходя из того, что δ_4 практически не зависит от длины радиатора, обладающего достаточной прозрачностью [2], мы можем воспользоваться зависимостью δ_4 от энергии для радиатора толщиной 10 радиационных единиц [2], учитывая при этом отличия характеристик используемых ФЭУ. Конечная зависимость энергетического разрешения черенковского γ -спектрометра от энергии γ -кванта показана на рис. 9 пунктирной кривой.

2. Оценка диапазона амплитуд импульсов с анода ФЭУ-65

Для обоснования выбора электронных схем, составляющих спектрометрический и временной тракты прибора, был оценен возможный диапазон амплитуд импульсов с анода ФЭУ-65. Число фотоэлектронов $d\Phi$, выбиваемых с фотокатода излучением Черенкова, испущенным на 1 см пути заряженной частицы, можно определить выражением [3]:

$$\frac{d\Phi}{dl} = \frac{2\pi}{137} \lambda_m \eta(\lambda_m) \varepsilon S_0 \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)} \right) \int \frac{S(\lambda) d\lambda}{\lambda^3}, \quad (1)$$

где $\eta(\lambda_m)$ — квантовая эффективность фотокатода в максимуме спектральной чувствительности;

$S'(\lambda)$ — относительная спектральная характеристика;

S_0 — интегральная чувствительность фотокатода;

ε — множитель, учитывающий потери черенковского света.

Для ФЭУ-65 интеграл в выражении (1) равен $3 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$ и $\eta(\lambda_m) = 3,5 \times 10^{-3} S_0$ фотоэлектронов/квант. Приняв $\beta=1$, $S_0=50 \text{ мка/лм}$, $\varepsilon=0,1$ и подставив в (1), получим $d\Phi/dl=16 \text{ фотоэл/см}$.

Длина пробега заряженной компоненты ливня в приближении Б равна

$$T = \frac{e}{e_k} x_0, \quad (2)$$

где

e_k — критическая энергия;

x_0 — радиационная единица.

Для электронов с энергией 500 МэВ $T=79 \text{ см}$. Следовательно, полное число фотоэлектронов Φ равно 1260, и заряд Q на аноде ФЭУ будет равен 2×10^{-10} кулон. Соответствующая амплитуда импульса на аноде ФЭУ равна [4] 1,2 вольта, т. е. при изменении энергии электронов до 1 ГэВ верхняя граница диапазона амплитуд импульсов без учета энергетического порога черенковского излучения не будет превышать 2,5 вольта.

3. Конструктивные особенности спектрометра и результаты калибровки

Конструкция черенковского спектрометра с одним множителем ФЭУ-65 отличается от конструкции предыдущего спектрометра лишь си-

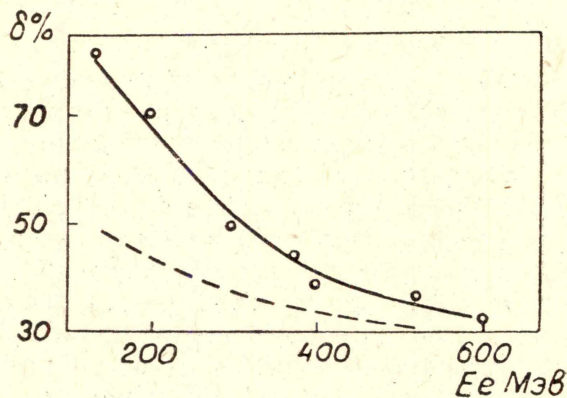


Рис. 9. Зависимость энергетического разрешения спектрометра от энергии электронов.

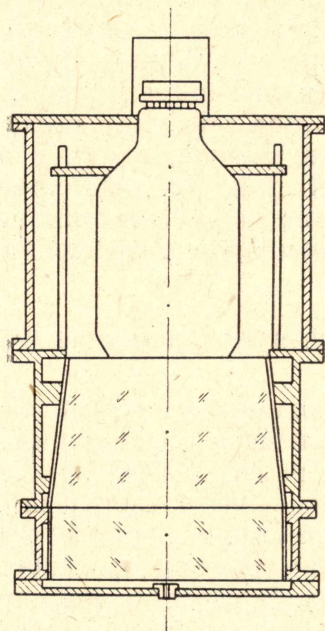


Рис. 10. Конструкция спектрометра с ФЭУ-65

стемой мягкого поджата ФЭУ (рис. 10). Несколько сложнее в этом случае процедура выбора оптимального режима питания ФЭУ. Это связано с необходимостью получения удовлетворительных временных и спектрметрических импульсов. Подбор ФЭУ-65 осуществлялся следующим образом. Для каждого экземпляра ФЭУ подбирался делитель напряжения питания, обеспечивающий минимальные амплитудные флуктуации и максимальную крутизну нарастания тока анода. Лучшие в этом отношении экземпляры подвергались следующему испытанию: измерялись амплитудные флуктуации при импульсной засветке всей площади фотокатода рассеянным светом от GaP светодиода. Выбранный экземпляр ФЭУ-65 имеет характеристики: однородность фотокатода 0,82, энергетическое разрешение с кристаллом NaI \varnothing 60 мм и h 20 мм и источником Cs¹³⁷ — 13%.

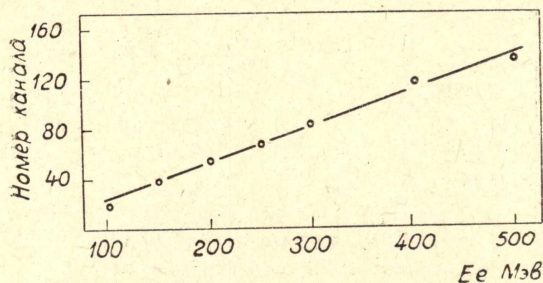


Рис. 11. Зависимость амплитуды импульса спектрометра от энергии электронов.

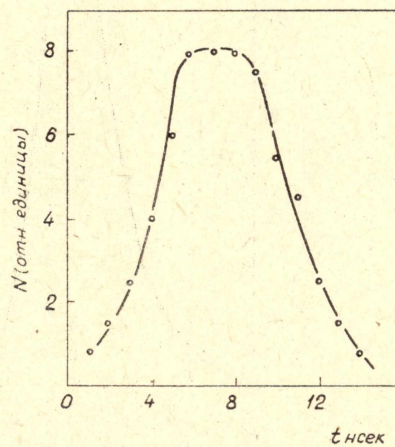


Рис. 12. Кривая задержанных совпадений сигналов спектрометра и проходного сцинтилляционного счетчика.

Импульс для амплитудного анализа берется с последнего диода ФЭУ, проходит линейный пропускатель, преобразуется интегратором и анализируется амплитудным анализатором АИ-256. Временной сиг-

нал берется с анода ФЭУ и поступает на формирователь стандартных импульсов. На рис. 9 и 11 приведены экспериментальные зависимости, характеризующие линейность прибора и его энергетическое разрешение. Несовпадение расчетной кривой и экспериментальных данных можно объяснить тем, что стекло радиатора обладает несколько меньшей прозрачностью, чем предполагалось в расчете, и ухудшенными условиями светосбора из первого блока. На рис. 12 дана кривая задержанных совпадений сигналов γ -спектрометра и сцинтилляционного счетчика, по которой можно судить о временном разрешении прибора.

III. γ -спектрометр с одним множителем типа ФЭУ-49

Использование в спектрометре одного спектрометрического множителя типа ФЭУ-49 затрудняет получение достаточно хорошего временного разрешения счетчика. При питании ФЭУ-49 с помощью паспортного делителя напряжения длительность импульса по основанию с анода составляет около 80 нс. Изменение первых трех сопротивлений позволило без ухудшения амплитудного разрешения ФЭУ уменьшить длительность импульса в 2 раза. В качестве формирователя стандартных импульсов во «временном» канале спектрометра использовалась схема с компенсацией амплитудной зависимости методом «пересечения нуля».

На рис. 13 приведено распределение интервалов времени между сигналами спектрометра и проходного сцинтилляционного счетчика, полученное с помощью время-амплитудного конвертора. Использование формирователей без амплитудной компенсации с временной привязкой к переднему фронту импульса приводило к сдвигу временных распределений на 3-4 нс при изменении энергии электронов от 200 до 600 МэВ.

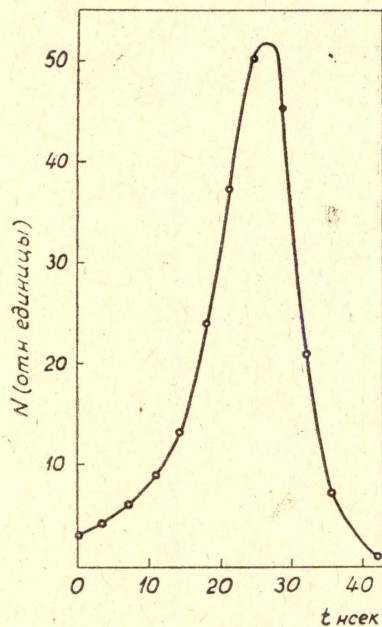


Рис. 13. Распределение интервалов времени между сигналами спектрометра и проходного сцинтилляционного счетчика.

В заключение отметим преимущества различных вариантов γ -спектрометров и замеченные их недостатки.

Первый вариант спектрометра, конструктивно наиболее сложный, обладает хорошим временным разрешением и имеет два временных сигнала, что позволяет с использованием схемы совпадений свести к минимуму уровень шумовых загрузок во «временном» и спектрометри-

ческом каналах спектрометра. Но это связано с уменьшением эффективности регистрации спектрометра.

Несмотря на электромагнитное экранирование баллонов ФЭУ, полностью устранить наводки ФЭУ друг на друга не удалось. Сдвинутые во времени сигналы и их наводки незначительно увеличивали уровень случайных совпадений. Использование в этом спектрометре спектрометрического умножителя типа ФЭУ-49 позволило получить относительно хорошее энергетическое разрешение.

Следующие два варианта спектрометра отличаются от предыдущего значительной простотой. Спектрометр с умножителем типа ФЭУ-65 имеет лучшее временное разрешение и плохое энергетическое, особенно при низких энергиях. Недостатком его является, кроме того, высокий уровень низкоэнергетических шумовых запусков, что затрудняет использование спектрометра при энергиях ~ 100 МэВ. Небольшая длительность импульса ФЭУ-65 (~ 20 нс по основанию) может оказаться решающим фактором при выборе типа спектрометра для работ в условиях загрузок до 20 МГц. Вариант спектрометра с одним умножителем типа ФЭУ-49 имеет хорошее энергетическое разрешение. Временное разрешение, равное 13 нс (ширина на полувысоте временного распределения), позволяет осуществлять достаточно быстрый и эффективный отбор событий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. А. Александров, А. В. Куценко, В. Н. Майков, В. В. Павловская. Труды ФИАН, **40**, 3, 1968.
 2. В. Ф. Грушин, Е. М. Лейкин. Труды ФИАН, **34**, 187, 1966.
 3. В. П. Зрелов. Изучение Вавилова-Черенкова и его применение в физике высоких энергий. Т. 2, Атомиздат, 1968.
 4. Ю. К. Акимов. Сцинтилляционные методы регистрации частиц больших энергий. Изд-во МГУ, 1963.
-