

УДК 539.1.08

РЕГИСТРАЦИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ЧЕРЕНКОВСКИМ СПЕКТРОМЕТРОМ ПОЛНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

В. И. Алексеев¹, В. А. Басков¹, В. А. Дронов¹, А. И. Львов¹,
А. В. Кольцов¹, Ю. Ф. Кречетов², Е. И. Малиновский¹, В. В. Полянский¹

Представлены результаты калибровки черенковского спектрометра полного поглощения на основе свинцового стекла ТФ-1 толщиной $14.8X_0$ на пучке квазимонохроматических электронов. Обнаружено, что в диапазоне энергий электронного пучка $E = 6 - 285$ МэВ энергетическое разрешение составляет 89–10%, соответственно.

Ключевые слова: калибровка, черенковский спектрометр полного поглощения, электронный пучок, энергетическое разрешение.

В настоящее время электронный синхротрон С-25Р (“Пахра”) Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) является единственным в России постоянно работающим ускорителем, генерирующим пучки фотонов, электронов и позитронов с энергиями до 850 МэВ. На тормозном пучке фотонов данного ускорителя создан калибровочный канал квазимонохроматических вторичных электронов с энергиями от 6 до 300 МэВ и интенсивностью ~ 100 электрон/сек [1–3].

Энергетические характеристики калибровочного электронного пучка, помимо других методов, определялись также с помощью черенковского спектрометра полного поглощения (ЧСПП) на основе свинцового стекла ТФ-1 толщиной 14.8 радиационных длин X_0 ($X_0 = 2.5$ см, $\rho = 3.86$ г/см³) [3–5].

Выбор ЧСПП определялся тем, что с помощью черенковских спектрометров возможно регистрировать фотоны, электроны (позитроны) и определять их энергию в широком диапазоне энергий от нескольких МэВ до десятков ГэВ [4, 5]:

1. Порог излучения фотонов электронами в тяжелых средах около сотен кэВ.
2. Энергетическое разрешение достаточно высокое (порядка 25% – 5%) в широком интервале энергий 0.1–100 ГэВ, соответственно.

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: baskov@x4u.lebedev.ru.

² ОИЯИ, 141980 Россия, Дубна.

3. Зависимость между энергией регистрируемой частицы и амплитудой сигнала, получаемого на выходе спектрометра, линейна.

4. С ростом энергии электронов и фотонов толщина радиатора, обеспечивающая полное поглощение энергии, увеличивается пропорционально логарифму энергии и в области до 0.5 ГэВ составляет около $15X_0$.

5. Особенность черенковского излучения позволяет получать на выходе фотоприемников импульсы наносекундной длительности, что дает возможность использовать сигналы со спектрометра в схемах быстрой электроники.

Для определения энергетических характеристик калибровочного пучка был использован ЧСПП, хорошо зарекомендовавший себя в работах на вторичном электронном пучке протонного ускорителя Института физики высоких энергий (ИФВЭ) в Протвино [3–5].

ЧСПП представляет собой шестигранный радиатор из свинцового стекла ТФ-1 с диаметром вписанной окружности 18 см и длиной 37 см (рис. 1). Со всех сторон, кроме площади, занимаемой фотокатодом ФЭУ, радиатор обернут алюминированным лавсаном. В ЧСПП использовался ФЭУ-49 со стандартным делителем.

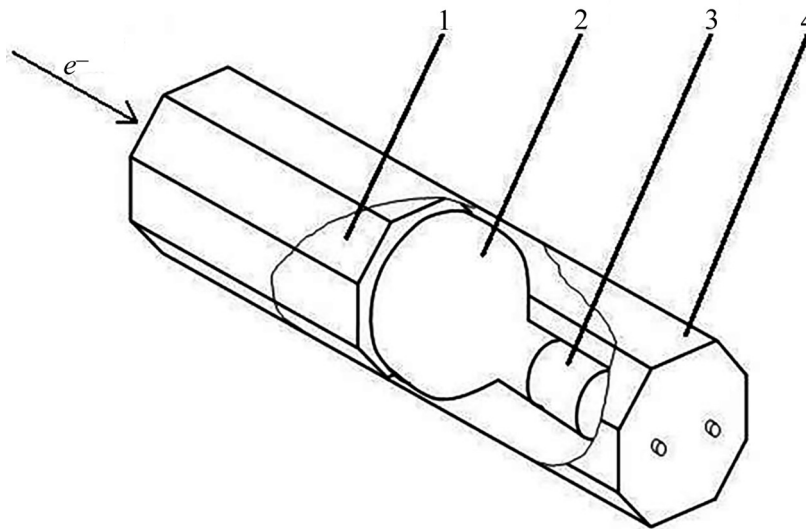


Рис. 1: Схема черенковского спектрометра полного поглощения (ЧСПП): 1 – радиатор, 2 – ФЭУ-49, 3 – делитель, 4 – корпус.

Предварительная калибровка ЧСПП была выполнена на космических мюонах по методу "напролет", представленному на вставке рис. 2 [3]. Триггером при калибровке являлся сигнал от совпадения сигналов двух сцинтилляционных счетчиков S_1 и S_2 с

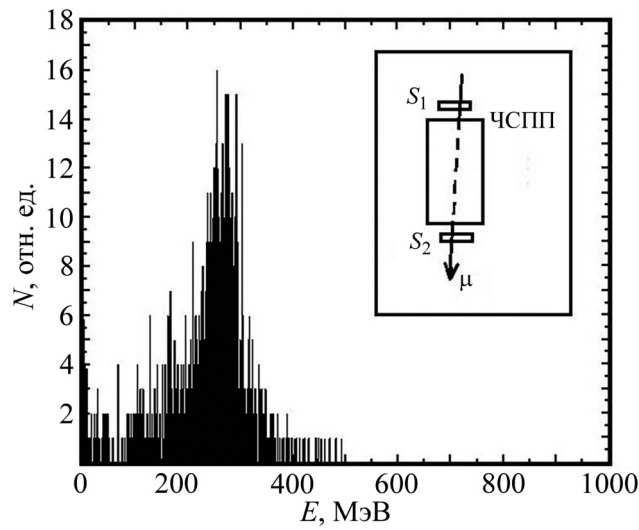


Рис. 2: Калибровочный спектр космических мюонов, измеренный ЧСПП. На вставке: S_1 и S_2 – сцинтилляционные счетчики.

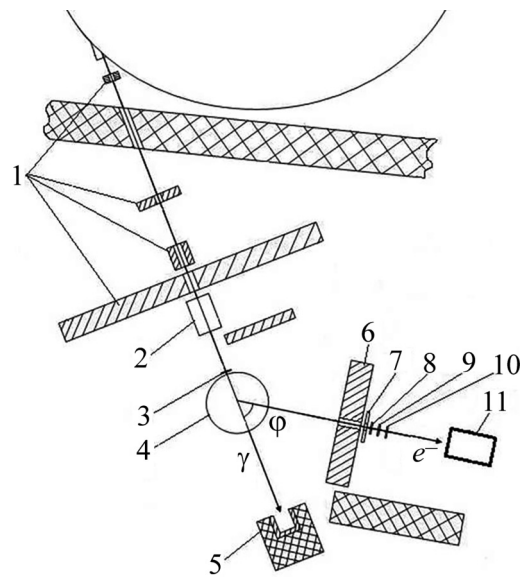


Рис. 3: Схема калибровки ЧСПП на квазимонохроматическом электронном пучке: 1 – свинцовые коллиматоры; 2 – очищающий магнит СП-3; 3 – конвертор; 4 – магнит СП-57; 5 – поглотитель фотонного пучка (“могильник”); 6 – коллиматор ($\text{Ø}10$ мм); 7 – сцинтилляционный счетчик “вето” А; 8 – сцинтилляционный счетчик S_1 ; 9 – сцинтилляционный счетчик S_2 ; 10 – сцинтилляционный счетчик S_3 ; 11 – ЧСПП.

размерами сцинтилляторов $70 \times 70 \times 5$ мм³. Среднее энерговыделение мюонов в радиаторе ЧСПП составило ≈ 285 МэВ, что соответствовало 275 каналу в амплитудном спектре (см. рис. 2) при напряжении на делителе питания ФЭУ-49 $U = 1600$ В. Коэффициент пропорциональности, связывающий среднюю энергию, оставленную космическим мюоном в ЧСПП, и среднюю амплитуду в спектре ($E = k \cdot A$), за вычетом пьедестала, составил $k \approx 1.04$ МэВ/канал.

Основная калибровка ЧСПП проходила на пучке квазимонохроматических электронов ускорителя “Пахра” одновременно с исследованием его энергетических характеристик [3]. Энергия электронов первичного пучка в камере ускорителя составляла 500 МэВ. Схема калибровки представлена на рис. 3. Электроны, являющиеся результатом взаимодействия тормозного фотонного пучка с конвертером (3) перед входом пучка в магнит СП-57 (4), отклонялись магнитным полем от основной траектории фотонного пучка. Электроны, двигающиеся под углом 36° , попадали в свинцовый коллиматор с диаметром отверстия 10 мм и толщиной 70 мм, находящийся на расстоянии 3 м от полюсов магнита СП-57 (6). Триггер формировался совпадением сигналов телескопа сцинтилляционных счетчиков (7–10) $T = (S_1 \cdot S_2 \cdot S_3) \cdot A$ (A – счетчик “вето” размером $60 \times 90 \times 10$ мм³, S_1 – S_3 – триггерные счетчики размером $15 \times 15 \times 1$ мм³).

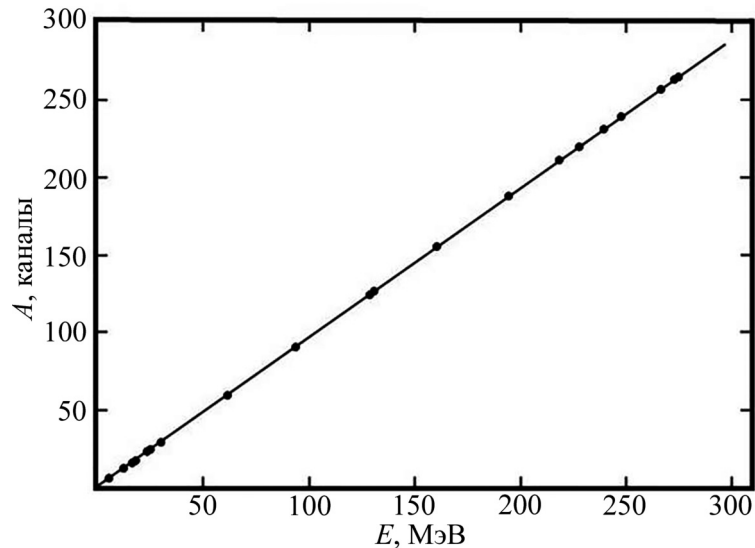


Рис. 4: Зависимость амплитуды сигнала ЧСПП (A) от энергии квазимонохроматического электронного пучка (E).

На рис. 4 представлена зависимость средних амплитуд сигналов с ЧСПП в номерах каналов зарядо-цифрового преобразователя (ЗЦП) от энергий электронного пучка,

определенных методом построения топографий магнитных полей, соответствующих заданным значениям тока обмоток магнита СП-57 с последующим расчетом прохождения электронов от конвертора до коллиматора. Видно, что во всем диапазоне исследованных энергий электронов зависимость линейная.

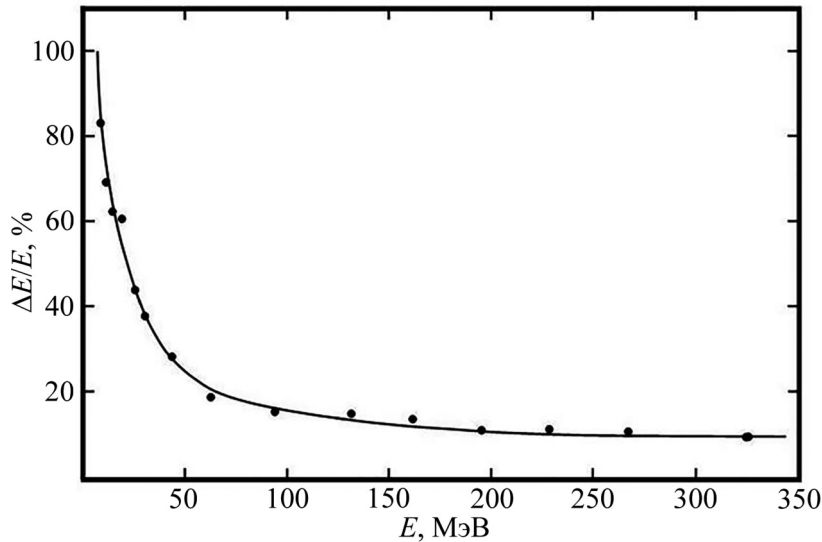


Рис. 5: Зависимость энергетического разрешения ЧСПП ($\Delta E/E$, где ΔE и E – полная ширина на половине высоты энергетического спектра и средняя энергия электронов, соответственно) от энергии квазимонохроматического электронного пучка (E).

Зависимость энергетического разрешения ЧСПП от энергии электронов за вычетом энергетического разрешения электронного пучка [3] представлена на рис. 5. Было определено, что разрешение ЧСПП в диапазоне энергий электронов 30–300 МэВ описывается как:

$$\Delta E/E = 0.015 + 0.05/\sqrt{E}, \quad (1)$$

где ΔE и E – ширина на половине высоты энергетического спектра и средняя энергия электронов в МэВ, соответственно.

В области низких энергий электронов 6–30 МэВ энергетическое разрешение ЧСПП хорошо описывается зависимостью:

$$\Delta E/E = 0.015 + 0.068/\sqrt{E}. \quad (2)$$

Можно предположить, что ухудшение разрешения ЧСПП в этой области энергий связано с увеличением флуктуаций фотоэлектронов на фотокатод ФЭУ, которые в

свою очередь связаны с недостаточным количеством черенковского света из-за уменьшения количества ливневых треков при низких энергиях электронов.

Ранее проведённая калибровка такого ЧСПП на пучках электронов с энергиями в десятки ГэВ определила энергетическое разрешение (без учета энергетического разрешения электронного пучка, которое при среднем импульсе электронов 31 ГэВ/с составляла $\sqrt{D_E} = 0.72$ ГэВ/с, где D_E – дисперсия по энергии электронов в первичном пучке) как [4, 5]:

$$\Delta E/E = 0.015 + 0.125/\sqrt{E}. \quad (3)$$

При энергиях электронов 30–300 МэВ формула (3) даже с учетом энергетического разрешения электронного пучка даёт значения разрешения спектрометра, превышающие экспериментальные в ~ 2.5 раза. Можно предположить, что это связано с тем, что в объеме спектрометра при 100% эффективности регистрации электронов их энергия полностью остается внутри детектора. Это хорошо видно из предварительной калибровки ЧСПП, при которой полное энерговыделение мюонов в ЧСПП составляет ≈ 285 МэВ [3]. При увеличении энергии электронов до нескольких ГэВ и выше из-за увеличения геометрических размеров электромагнитных ливней, развивающихся в спектрометре, они не будут укладываться в объеме спектрометра и часть энергии ливней будет уходить через боковые стороны и заднюю часть спектрометра, что должно сказываться на относительном энергетическом разрешении прибора.

Таким образом, черенковский спектрометр полного поглощения имеет хорошее энергетическое разрешение не только при энергиях электронов в десятки ГэВ, но и в диапазоне энергий ~ 300 МэВ, что даёт возможность использовать спектрометр в исследованиях энергетических характеристик калибровочных электронных пучков. Хорошие временные характеристики черенковского излучения при предполагаемой замене “медленного” ФЭУ-49 на “быстродействующие”, например, ФЭУ-63 или ХР2040 даст возможность использовать ЧСПП в исследованиях энергетических характеристик интенсивного (10^4 – 10^6 электрон/сек) электронного пучка, выведенного из ускорителя “Пахра”.

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (NISA – РФФИ) № 18-02-40061 и № 18-02-40079.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] <http://sites.lebedev.ru/ru/OFVE/735.html>.
- [2] Е. Г. Бессонов, Е. И. Малиновский, Г. Г. Субботин, Препринт ФИАН № 28 (ФИАН, Москва, 2006).

- [3] В. И. Алексеев, В. А. Басков, В. А. Дронов и др., ПТЭ, № 2 (2019) (в печати).
- [4] В. А. Басков, А. С. Белоусов, В. В. Ким и др., ПТЭ, № 5, 66 (2011).
- [5] А. С. Белоусов, Я. А. Ваздик, Е. И. Малиновский и др., Препринт ФИАН № 100 (ФИАН, Москва, 1973).

Поступила в редакцию 5 апреля 2019 г.

После доработки 10 сентября 2019 г.

Принята к публикации 11 сентября 2019 г.