

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.08

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С ПОМОЩЬЮ ЛЕГКОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА

© 2020 г. В. И. Алексеев^а, В. А. Басков^{а,*}, В. А. Дронов^а, А. И. Львов^а,
А. В. Кольцов^а, Ю. Ф. Кречетов^б, В. В. Полянский^а

^а Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН (ФИАН)

Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

^б Объединенный институт ядерных исследований

Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

*e-mail: baskov@x4u.lebedev.ru

Поступила в редакцию 13.03.2020 г.

После доработки 30.03.2020 г.

Принята к публикации 07.04.2020 г.

Экспериментально показана возможность использования эффекта полного энерговыделения в легком сцинтилляторе при прохождении через него электронного пучка для определения энергетических характеристик пучка низких и средних энергий (метод “поглощенной энергии”). С помощью сцинтилляционных детекторов толщиной 14.5, 20, 23.5 и 51.2 см проведена энергетическая калибровка квазимонохроматического электронного пучка ускорителя “Пахра” ФИАН. При энергиях электронного пучка до ~100 МэВ и толщинах сцинтилляционного детектора от 5 до 20 см точность определения энергии электронного пучка может составлять 10–20% соответственно

DOI: 10.31857/S0032816220050079

ВВЕДЕНИЕ

Энергетические характеристики электронного пучка включают максимальную и среднюю энергию, а также энергетический спектр. Информацию об энергетических параметрах пучка несут синхротронное, черенковское и переходное излучения. Полная энергия пучка непосредственно измеряется калориметрическим методом. Энергетические характеристики могут определяться как одним из методов, так и одновременно несколькими [1].

В данной работе показана возможность определения энергетических характеристик электронного пучка в диапазоне энергий несколько сот мегаэлектронвольт с помощью калориметрического метода, в котором используется легкий сцинтиллятор. Суть метода заключается в определении характеристик пучка с помощью изменения толщин сцинтилляционных детекторов или изменении энергии электронного пучка при фиксированной толщине сцинтиллятора до такой величины, при которой траектория отдельных электронов полностью укладывается в объеме детектора. В этом случае средняя энергия электронов пучка соответствует интегралу средних ионизационных потерь электрона на единицу пути в детекторе $\langle E \rangle = kL$, где $k = \Delta E / \Delta x$ ($\Delta E / \Delta x$ – средняя величина ионизационных потерь электронов на единицу пути в

детекторе), L – толщина сцинтилляционного детектора) [2].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования были выполнены на квазимонохроматическом пучке вторичных электронов ускорителя “Пахра” ФИАН (рис. 1). Конвертером являлась медная пластина толщиной 3 и $\varnothing 3.2$ мм, расположенная на “срезе” полюсов магнита [3]. Триггерным сигналом T являлся сигнал от совпадения сигналов сцинтилляционных счетчиков из полистирола S_1-S_3 и счетчика антисовпадений A с диаметром отверстия 10 мм ($T = (S_1 \cdot S_2 \cdot S_3) \cdot A$). Размеры счетчиков S_1-S_3 и A составляли $15 \times 15 \times 1$ и $60 \times 90 \times 10$ мм, соответственно. Интенсивность вторичного электронного пучка составляла $\sim 10^2$ $e^-/с$.

В работе были использованы два сцинтилляционных детектора ($СД$) из полистирола размерами $20 \times 20 \times 20$ см ($СД_1$) и $14.5 \times 23.5 \times 51.2$ см ($СД_2$) – рис. 2. Сцинтилляторы просматривались сборкой из 7 фотоэлектронных умножителей (ф.э.у.) ФЭУ-85. Сборки ф.э.у. без смазки были плотно прижаты к поверхности сцинтилляторов. Сцинтилляторы за исключением площади, занятой фотокатодами ф.э.у., были обернуты металлизированным майларом и черной бумагой.

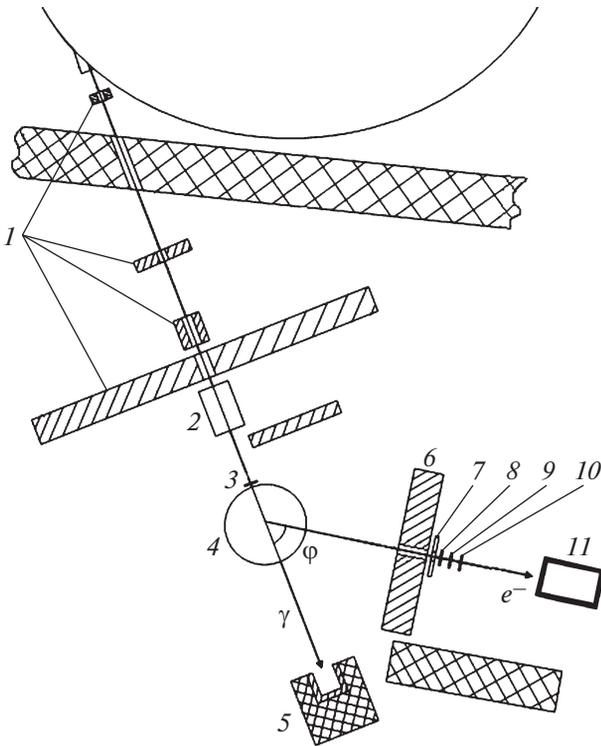


Рис. 1. Схема квазимонохроматического пучка вторичных электронов ускорителя “Пахра” ФИАН. 1 – свинцовые коллиматоры; 2 – очищающий магнит СП-3; 3 – конвертор; 4 – магнит СП-57; 5 – поглотитель фотонного пучка (“могильник”); 6 – коллиматор ($\varnothing 10$ мм); 7 – сцинтилляционный счетчик антисовпадений A ; 8–10 – триггерные сцинтилляционные счетчики S_1 – S_3 ; 11 – сцинтилляционный детектор (CD).

Многоканальность на основе сборки ФЭУ-85 связана с сохранением величины светособирания с площади сцинтиллятора, определяемой площадью фотокатода ФЭУ-49, с незначительной потерей энергетического разрешения, но имеющего существенно более высокое быстродействие, необходимое при работе с электронным пучком. CD в дальнейшем планируется использовать в эксперименте с наличием значительного низкоэнергетического электромагнитного фона $\sim 10^4$ – 10^5 частиц/с.

Амплитудой CD являлась сумма сигналов со всех ф.э.у. сборки за вычетом постоянной составляющей зарядоцифрового преобразователя (ЗЦП) (“пьедестала”) каждого канала. Можно предположить, что незначительный ток вторичных электронов ($I \sim 0.03$ нА [4]) практически не влияет на амплитуду сигнала CD ; специального исследования не проводилось.

Схема исследований представлена на рис. 2. На первом этапе (рис. 2а) исследовались энергетические характеристики CD_1 , когда толщина счетчика по пучку составляла 20 см, на втором

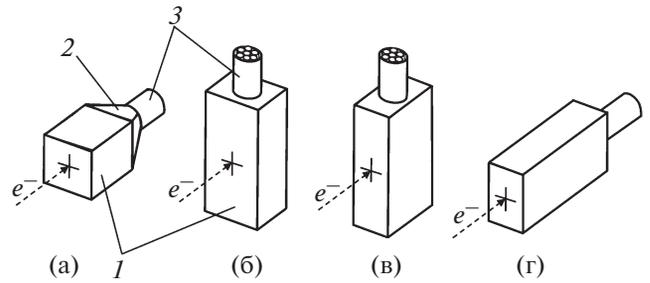


Рис. 2. Схема исследований энергетических характеристик сцинтилляционного детектора: а – сцинтилляционный детектор (CD_1) размером $20 \times 20 \times 20$ см (толщина по пучку 20 см); б–г – сцинтилляционный детектор (CD_2) размером $14.5 \times 23.5 \times 51.2$ см³ (толщина по пучку: б – 14.5 см (S_1), в – 23.5 см (S_2), г – 51.2 см (S_3)). 1 – сцинтилляционный блок; 2 – светосборник; 3 – сборка из 7 фотоэлектронных умножителей ФЭУ-85.

(рис. 2б) на пучке исследовался CD_2 толщиной 14.5 см, на третьем (рис. 2в) – CD_2 толщиной по пучку 23.5 см и на последнем четвертом этапе (рис. 2г) исследовались характеристики CD_2 толщиной по пучку 51.2 см.

Блок-схема измерений представлена на рис. 3. Сигналы с S_1 – S_3 длительностью $t = 10$ нс подавались на формирователи Φ_1 – Φ_3 (пороговое напряжение всех формирователей $U_{пор1-3}$ составляло 30 мВ) и далее через задержки Z_1 – Z_3 подавались на схему совпадений CC . На вход “Анти” подавался сигнал от счетчика антисовпадений A длительностью 100 нс, формируемый формирователем Φ_4 . Сигнал с CC являлся триггерным сигналом $Start$ для запуска блока 8-входового ЗЦП, с помощью которого через крейт-контролер системы КАКМАК проводилась запись сигналов со сцинтилляционного детектора в память компьютера.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 представлена типичная зависимость средней амплитуды CD_1 толщиной 20 см в зависимости от энергии пучка вторичных электронов, где видно, что при энергии электронов 40 МэВ происходит резкое изменение зависимости. При дальнейшем увеличении энергии электронов величина зарегистрированной энергии меняется слабо. Это означает, что на толщине детектора 20 см средние ионизационные потери электронов составили $\langle E \rangle = (\Delta E / \Delta x) L = 2 [МэВ/см] \cdot 20 [см] = 40$ МэВ и при повышении энергии больше не увеличиваются (для CD , используемых в данной работе, ионизационные потери составляли $\Delta E / \Delta x \approx 2$ МэВ/см [2]).

На рис. 5 представлена зависимость средней амплитуды CD для всех измеренных толщин от энергии вторичного электронного пучка. Видно,

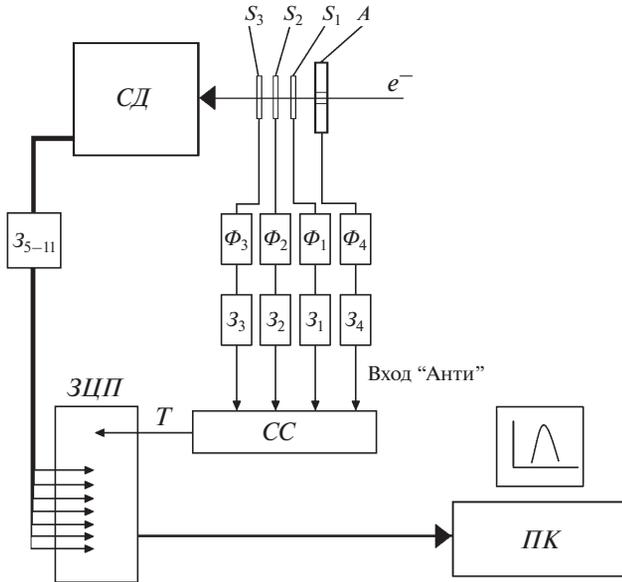


Рис. 3. Структурная блок-схема измерений энергетических характеристик сцинтилляционного детектора. $З_1$ – $З_{11}$ – блок задержек, Φ_1 – Φ_4 – формователи со следящим порогом, $СС$ – 4-канальная схема совпадений, $ЗЦП$ – зарядоцифровой преобразователь, $ПК$ – персональный компьютер, $СД$ – сцинтилляционный детектор.

что зависимость I определяет толщины $СД$, когда треки электронов находятся внутри объема $СД$, а зависимости 2–5 определяют ситуацию, когда треки электронов пучка выходят за пределы $СД$. Поэтому зависимость I можно назвать “поглощенной энергией”, а точку резкого изменения зависимости – “точкой перегиба”.

На рис. 6 представлена зависимость средней амплитуды сигнала $СД$ от толщины сцинтиллятора в четырех “точках перегиба”, показанных на рис. 5. Видно, что в пределах исследованных толщин $СД$ зависимость имеет линейный характер. Однако при экстраполяции зависимости в область энергий, близких к нулю, зависимость перестает быть линейной.

На рис. 7 представлена итоговая зависимость энергии электронного пучка, определенной данным методом (E_{ab}), от энергии электронов, определенной оценкой средних ионизационных потерь на соответствующей толщине $СД$ (E_e). Видно, что зависимость линейная и в пределах ошибок (в данном случае в ошибки энергетического разрешения входят влияние медного конвертора, формирующего электронный пучок, и энергетическое разрешение самого $СД$). Кроме того, значения энергии пучка, определенные экспериментальным методом, совпадают со значениями энергии пучка вторичных электронов, формируемого на основе тормозного фотон-

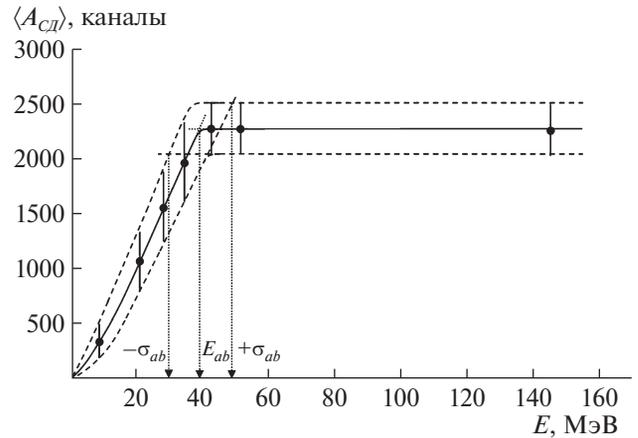


Рис. 4. Зависимость средней амплитуды $A_{СД}$ сигнала сцинтилляционного детектора $СД_1$ от энергии квази-монохроматического электронного пучка E . E_{ab} и σ_{ab} – энергия электронного пучка и ошибка энергии электронного пучка, определенная методом “поглощенной энергии”, соответственно.

ного пучка магнитной системой и детектируемого $СД$ (рис. 1 и 4) [3].

Ошибка значения энергии электронов в любой “точке перегиба” определялась экстраполяцией ошибок энергий, определенных до и после “точки перегиба”, в “точку перегиба” по соответствующим траекториям “ $E_{ab} - \sigma_{ab}$ ” и “ $E_{ab} + \sigma_{ab}$ ” (рис. 4). Для толщин детектора 20 см значение энергии пучка в “точке перегиба” составило $E_{ab} = 40 \pm 10$ МэВ.

Предварительная калибровка обоих $СД$, выполненная на одиночных космических мюонах

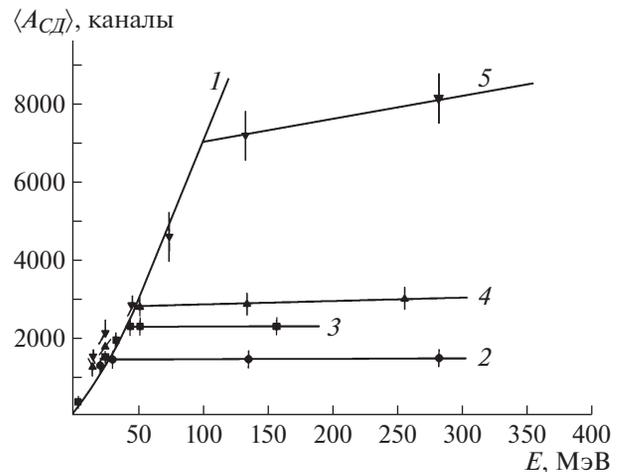


Рис. 5. Зависимости средних амплитуд $A_{СД}$ сигналов сцинтилляционных детекторов $СД_1$ и $СД_2$ от энергии квази-монохроматического электронного пучка E до “точки перегиба” (1) и после “точки перегиба” (2–5; толщина $СД_1$ и $СД_2$ по пучку: 2 – 14.5 см, 3 – 20 см, 4 – 23.5 см, 5 – 51.2 см).

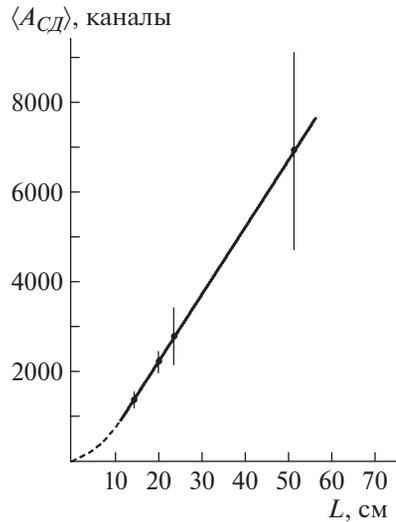


Рис. 6. Зависимость средних амплитуд A_{CD} сигналов сцинтилляционных детекторов CD_1 и CD_2 от толщины детекторов по пучку L .

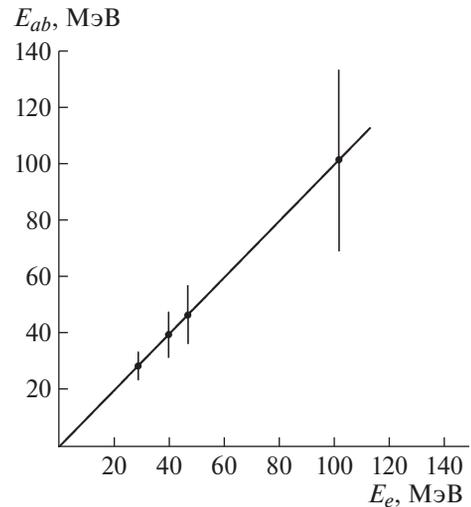


Рис. 7. Зависимость энергии электронного пучка E_{ab} , определенной методом “поглощенной энергии”, от энергии электронов E_e , определенной оценкой средних ионизационных потерь на соответствующей толщине CD .

по методу “напролет” [3], показала, что энергетическое разрешение CD толщиной 20 см составляет $\sigma = 9\%$ ($\sigma = \Delta E_{\mu}/E_{\mu}/2.35$, ΔE_{μ} – полная ширина энергетического спектра космических мюонов на половине его высоты, E_{μ} – среднее энерговыделение космическими мюонами в CD).

Таким образом, за вычетом энергетического разрешения предварительной калибровки, которая определяет энергетическое разрешение самого CD , величина энергии вторичного электронного пучка, определенная CD , составляет $E_{ab} = 40 \pm 9$ МэВ. Если учесть энергетическое разрешение пучка вторичных электронов, формируемых конвертером, $\sigma \approx 12\%$ ($\sigma = \Delta E/E/2.35$, ΔE – полная ширина энергетического спектра электронного пучка на половине его высоты, E – средняя энергия электронного пучка) [3]), то значение энергии составляет $E_{ab} = 40 \pm 8$ МэВ. Данное разрешение является разрешением исследуемого метода и определяется флуктуациями длины среднего пробега электронов пучка на толщине CD .

Рис. 8 представляет зависимость энергетического разрешения электронного пучка, определенного данным методом, от толщины L сцинтилляционных детекторов (разрешения самого детектора вычтено). На этом рисунке зависимость 1 определяет энергетическое разрешение электронного пучка с учетом влияния медного конвертора (рис. 6), в зависимости 2 влияние конвертора вычтено. Видно, что наибольшее влияние конвертора сказывается при толщинах CD $L < \sim 40$ см или $L < \sim 1X_0$ ($X_0 \approx 40$ см – радиационная длина полистирола [2]). Точность определения энергии пучка улучшается с уменьшением толщины CD .

Надо отметить, что вид амплитудных спектров CD в зависимости от энергии электронного пучка качественно меняется. На рис. 9 представлены амплитудные спектры CD толщиной 20 см (рис. 4) при энергиях электронного пучка до “точки перегиба” ($E = 9$ МэВ, рис. 9а), близко к “точке перегиба” ($E = 45$ МэВ, рис. 9б) и за “точкой перегиба” ($E = 145$ МэВ, рис. 9в). Видно, что при энергиях электронов, больших энергии, оставленной электроном на толщине CD (рис. 9в), вид спектра фактически определяется распределением Ландау [2].

Степень изменения спектра можно оценить, используя метод коэффициента β [5]. Для каждого

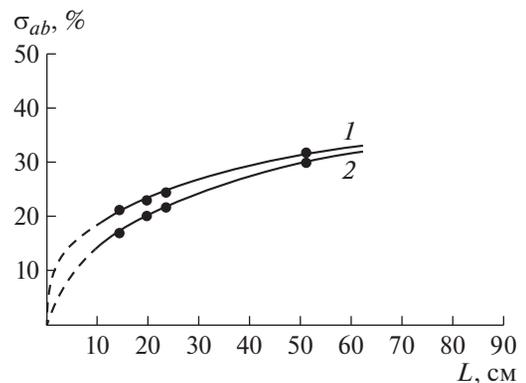


Рис. 8. Зависимость энергетического разрешения электронного пучка, измеренного методом “поглощенной энергии”, от толщины L сцинтилляционных детекторов: 1 – с учетом влияния медного конвертора, 2 – без учета его влияния.

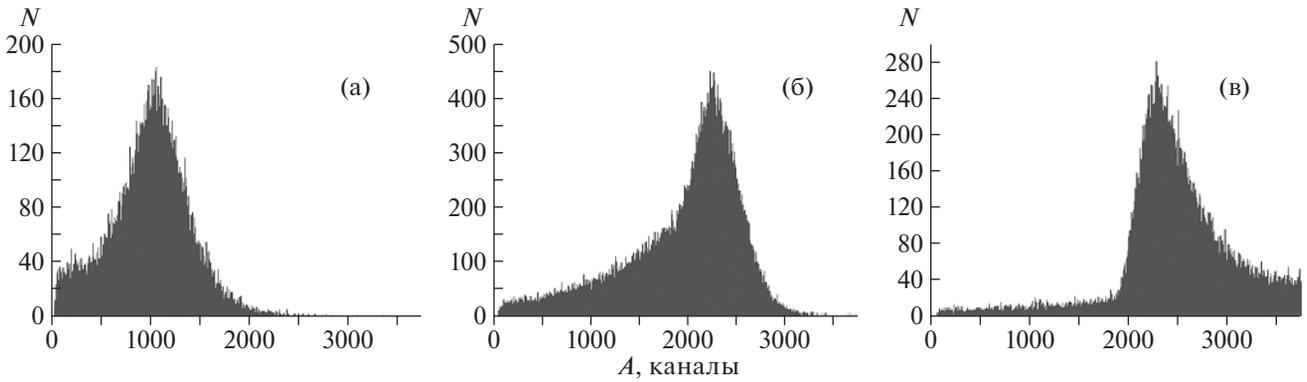


Рис. 9. Амплитудные спектры сцинтиляционного детектора толщиной 20 см при энергиях электронного пучка: **а** – до “точки перегиба” ($E = 9$ МэВ), **б** – близко к “ точке перегиба” ($E = 45$ МэВ), **в** – за “ точкой перегиба” ($E = 145$ МэВ).

спектра вычисляется отношение $\beta = \alpha_{\text{правый}}/\alpha_{\text{левый}}$, где $\alpha_{\text{правый}} = \sum_{i=m+1}^{k_{\text{max}}} N_i$ и $\alpha_{\text{левый}} = \sum_{i=k_{\text{min}}}^m N_i$ – число событий в правой и левой частях спектра, соответственно, относительно канала m , который определяет канал среднего значения амплитуды в спектре; N_i – число событий в i -м канале спектра; k_{min} и k_{max} – номера минимального и максимального каналов спектра с ненулевым числом событий.

На рис. 10 представлена зависимость коэффициента β от энергии электронного пучка. Видно, что с увеличением энергии пучка спектр начинает меняться, максимальное изменение спектра достигается при $E_e \approx 28$ МэВ. Точка перегиба, при которой $\beta = 1$, соответствует $E_e \approx 40$ МэВ. Это означает, что в данной точке треки электронов оптимально укладываются на толщине CD . В ином случае будут превалировать треки, соответствующие меньшим энерговыделениям (левая часть спектра, рис. 9а) или треки, соответствующие большим энерговыделениям (правая часть спектра, рис. 9в).

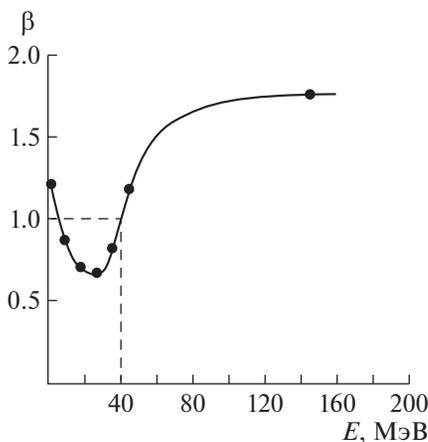


Рис. 10. Зависимость коэффициента β от энергии электронного пучка E .

В работе использовались CD на основе полистирола ($\rho \approx 1$ г/см³ [2]), использование CD из более плотного материала, например, на основе кристаллов NaI(Tl), PbWO₄ и других ($\rho > 3$ г/см³ [2]) требует дополнительных исследований. Однако можно предположить, что для определения энергии электронного пучка в несколько сот мегаэлектронвольт толщина CD из плотного материала (как и из легкого) должна составлять $L < \sim (1-2)X_0$. На больших толщинах CD начинают развиваться электромагнитные ливни и выделяться энергия с более чем одного электронного трека, что ведет к неточному определению энергии пучка данным методом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный метод “поглощенной энергии”, связанный с достижением полного энерговыделения частиц в сцинтиляционном детекторе из легкого материала, позволяет определять энергию электронного пучка и может быть использован в экспериментальной деятельности. Область использования предпочтительна при энергиях в сотни мегаэлектронвольт и толщинах сцинтиляционного детектора, предположительно, до ~ 100 см ($\sim 2.5X_0$), т.е. до области начала развития электромагнитного ливня. В области энергий десятки мегаэлектронвольт и толщинах CD до ~ 20 см ($\sim 0.5X_0$) точность определения энергии электронного пучка может составить $\sim 10-20\%$, что близко к точности определения энергии пучка традиционными методами, например, черенковским спектрометром полного поглощения [6].

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Москалев В.А., Сергеев Г.И.* Измерение параметров пучков заряженных частиц, М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. *Калиновский А.Н., Мохов Н.В., Никитин Ю.П.* Прохождение частиц высоких энергий через вещество. М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. *Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кречетов Ю.Ф., Малиновский Е.И., Павлюченко Л.Н., Полянский В.В., Сидорин С.С.* // ПТЭ. 2019. № 2. С. 5. <https://doi.org/10.1134/S0032816219020162>
4. *Алексеев В.И., Басков В.А., Далькаров О.Д., Кольцов А.В., Львов А.И., Мамонов И.А., Павлюченко Л.Н., Полянский В.В.* // Краткие сообщения по физике. 2019. № 11. С. 37. <https://doi.org/10.3103/S1068335619110071>
5. *Басков В.А., Ким В.В., Хабло В.А.* // ПТЭ. 2010. № 4. С. 13.
6. *Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И., Кольцов А.В., Кречетов Ю.Ф., Малиновский Е.И., Полянский В.В.* // Краткие сообщения по физике. 2019. № 9. С. 31. <https://doi.org/10.3103/S1068335619090057>