

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.08

КАЛИБРОВОЧНЫЙ КВАЗИМОНОХРОМАТИЧЕСКИЙ ПУЧОК ВТОРИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ УСКОРИТЕЛЯ “ПАХРА”

© 2019 г. В. И. Алексеев^а, В. А. Басков^{а,*}, В. А. Дронов^а, А. И. Львов^а,
Ю. Ф. Кречетов^б, Е. И. Малиновский^а, Л. Н. Павлюченко^а, В. В. Полянский^а, С. С. Сидорин^а

^а Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН

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 16.07.2018 г.

После доработки 09.10.2018 г.

Принята к публикации 01.11.2018 г.

Представлены характеристики калибровочного квазимонохроматического пучка вторичных электронов ускорителя “Пахра” ФИАН на основе магнита СП-57. Энергетическое разрешение пучка с медным конвертором в диапазоне толщин 0.1–5 мм и межполюсным зазором магнита 6 см в диапазоне энергий электронного пучка $E = 98–294$ МэВ составило $\delta = 10–4.5\%$ соответственно.

DOI: 10.1134/S0032816219020162

Создание новых недорогих инструментальных средств тестирования и контроля применяемых детекторов, новых материалов, радиационной стойкости оптических и электронных компонентов на основе действующих в России ускорителей средних энергий является важным и востребованным [1–6].

В настоящее время синхротрон “Пахра” является единственным в России постоянно работающим ускорителем, генерирующим пучки фотонов, электронов и позитронов с энергиями до 850 МэВ.

Пучки фотонов тормозного излучения на электронном синхротроне “Пахра” образуются при взаимодействии ускоренного пучка электронов с внутренней вольфрамовой мишенью толщиной $0.22X_0$ (X_0 — радиационная длина), помещенной внутри вакуумной камеры ускорителя. Синхротрон имеет частоту повторения 50 Гц и в настоящее время позволяет работать при энергии ускоренных электронов в диапазоне 200–850 МэВ и интенсивностью пучка $\sim 2 \cdot 10^{12}$ $e^-/с$. Наличие системы растяжки пучка (во время сброса на внутреннюю мишень ускорителя) до 3 мс обеспечивает фактор заполнения (Duty Faktor) до величины 0.15. Ускоритель “Пахра” рассчитан и используется для получения γ -квантов с максимальной энергией $E_{\gamma \max} = 200–850$ МэВ. Средняя интенсивность фотонных пучков составляет $I_\gamma \sim 3 \cdot 10^9$ $\gamma/с$. Наличие двух автономных каналов для пучков тормозного излучения и выведенного

пучка электронов позволяет проводить одновременно несколько экспериментов [7, 8].

В данной работе представлены характеристики калибровочного пучка вторичных электронов ускорителя ФИАН “Пахра” на основе магнита СП-57, который в настоящее время используется в тестировании и калибровках детекторов и электронного оборудования астрофизической установки “Гамма-400”.

Схема калибровочного пучка вторичных электронов представлена на рис. 1. Тормозной пучок, образованный в результате сброса электронов в кольцо на внутреннюю мишень, после выхода из камеры ускорителя I формируется свинцовым коллиматором K_1 с диаметром отверстия 13 мм, находящимся от выходного фланца ускорителя на расстоянии 3.2 м. Далее пучок по воздуху транспортируется к конвертору δ , находящемуся непосредственно на магните СП-57. В магните осуществляется разделение выходящих из конвертора электронов (позитронов) по импульсам. Вторичный пучок электронов формируется под определенным углом с помощью коллиматоров и сцинтилляционных счетчиков.

Для уменьшения электромагнитного фона, возникающего от взаимодействия ускоренных электронов с внутренней мишенью ускорителя, взаимодействия фотонов тормозного излучения с коллиматором K_1 и с воздухом, на расстоянии 9.7 м от K_1 помещен коллиматор K_2 с отверстием разме-

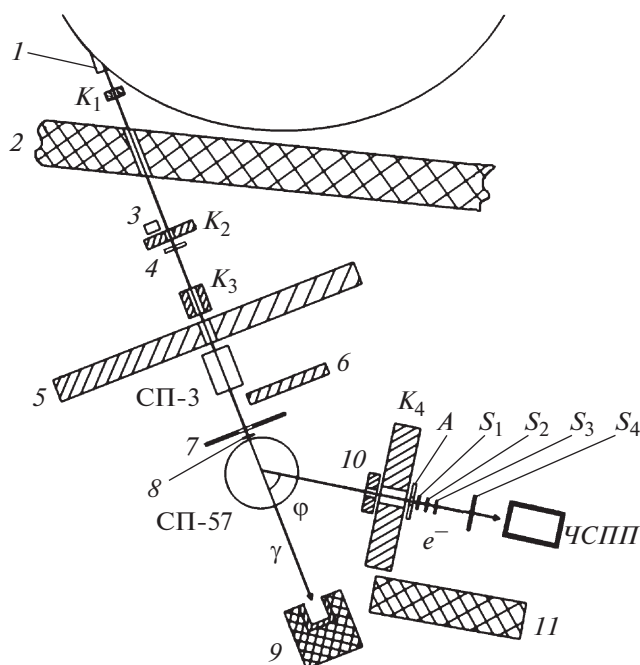


Рис. 1. Схема калибровочного квазимонохроматического пучка вторичных электронов. K_1 – K_4 – коллиматоры; A – сцинтилляционный счетчик антисовпадений; S_1 – S_4 – сцинтилляционные счетчики; ЧСПП – черенковский счетчик полного поглощения; СП-3 – очищающий магнит; СП-57 – магнит; 1 – выходное окно камеры ускорителя; 2 – бетонная стена ускорительного зала; 3 – монитор “растяжки”; 4 – монитор пучка; 5 – протяженная свинцовая стенка; 6 – дополнительная свинцовая стенка; 7 – металлическая плита; 8 – конвертор; 9 – поглотитель фотонного пучка (“могильник”); 10 – дополнительный коллиматор перед основным K_4 ; 11 – бетонный блок.

ром 100×100 мм и толщиной 100 мм. Для более эффективного подавления фона и соответственно улучшения энергетического разрешения вторичного пучка электронов, а также для формирования необходимого размера фотонного пучка, на расстоянии 13 м от K_2 был помещен специальный коллиматор K_3 типа “скрайбер”.

“Скрайбер” является коллиматором, состоящим из нескольких последовательно расположенных коллиматоров с изменяющимися диаметрами отверстий для прохождения пучка. Данный коллиматор состоял из четырех коллиматоров каждый длиной по пучку 70 мм, расположенных последовательно на расстоянии 70 мм друг от друга. Диаметры входных отверстий последовательно были следующими: 35, 30, 35 и 30 мм.

Для исключения электромагнитного фона, сопровождающего транспортируемый фотонный пучок, и фона, идущего с коллиматора в бетонной стене между ускорительным и экспериментальным залами, за K_3 смонтирована продолжительная (5.5 м) свинцовая защитная стена с диамет-

ром коллиматора для прохождения фотонного пучка 35 мм. Данная стена также была предназначена для защиты исследовательской аппаратуры в месте калибровок за коллиматором K_4 .

На расстоянии 1.35 м от свинцовой стены помещен очищающий магнит СП-3 с размером полюсов 200×500 мм и межполюсным зазором 50 мм. Напряженность магнитного поля была постоянной и составляла $H_{СП-3} = 0.37$ Тл. Для подавления низкоэнергетической части электромагнитного фона между K_2 и K_3 помещался парафиновый или текстолитовый фильтр толщиной 50–150 мм (на схеме не показан).

Электроны или позитроны, в зависимости от направления магнитного поля магнита СП-57, возникшие от взаимодействия фотонного пучка с конвертором 8, отклонялись в свинцовый коллиматор K_4 с диаметром входного отверстия 30 мм и толщиной 30 см, расположенного под углом $\varphi = 36^\circ$ относительно первичной траектории фотонов на расстоянии 3 м от полюсов магнита. В зависимости от задачи диаметр коллиматора K_4 можно было уменьшать постановкой перед ним дополнительного свинцового коллиматора 10 с диаметром отверстия от 3 до 16 мм. В качестве конвертора 8 использовались медные пластины толщиной 0.1–5 мм и шириной 5–50 мм.

Диаметр полюсов СП-57 составлял 90 см, “стандартный” межполюсной зазор 10 см. Для улучшения энергетического разрешения калибровочного пучка и уменьшения токовой нагрузки на обмотки магнита, с помощью дополнительных железных вставок $\varnothing 93$ и толщиной 2 см, межполюсной зазор был уменьшен до 6 см. Зависимость магнитного поля в центре магнита СП-57 от тока для двух вариантов межполюсного зазора представлена на рис. 2. Измерения были проведены с помощью измерителя магнитной индукции Ш1-8, ошибка измерения каждой точки не превышала ± 0.001 Тл.

Для исключения влияния магнитного поля СП-57 на исследовательскую аппаратуру, расположенную перед этим магнитом, перед магнитом была помещена железная пластина 7 размером 2.5×1.4 м и толщиной 15 мм с отверстием для прохождения фотонного пучка $\varnothing 100$ мм (рис. 1). Пластина являлась также дополнительной защитой от низкоэнергетического фона, возникающего от взаимодействия фотонного пучка с воздухом при транспортировке.

Общая длина фотонного канала от выходного фланца ускорителя до конвертора 8 составила ~ 40 м.

Триггерная система (рис. 1) включала счетчики A , S_1 – S_4 , расположенные вдоль траектории электронного пучка за коллиматором K_4 . Сцинтилляционный счетчик “вето” A размером $60 \times 90 \times$

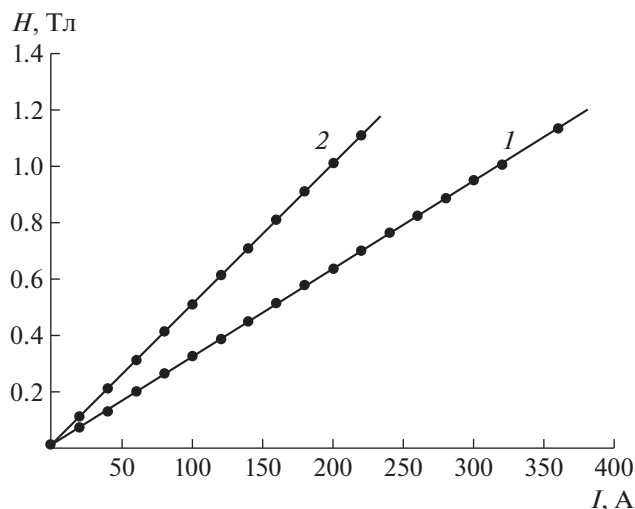


Рис. 2. Зависимость поля в центре магнита СП-57 от тока питания обмоток и расстояния между полюсами L : 1 – 10 см; 2 – 6 см.

$\times 10$ мм с отверстием $\varnothing 10$ мм расположен сразу за K_4 . Он предназначен для формирования электронного пучка и устранения частиц, рассеянных от краев коллиматора. Сразу за счетчиком A располагался телескоп из сцинтилляционных счетчиков S_1-S_3 . Расстояние между каждым из счетчиков составляло 7 см. Счетчик S_4 располагался непосредственно перед исследуемым детектором и мог находиться на расстоянии от 5 до 150 см от телескопа. В данных исследованиях расстояние составляло 120 см. Размер счетчиков S_1-S_3 составлял $15 \times 15 \times 1$ мм. Размер S_4 мог меняться в зависимости от условий калибровки исследуемого детектора. В данных измерениях его размер составлял $40 \times 40 \times 5$ мм. Для снятия сигнала во всех сцинтилляционных счетчиках использовались ФЭУ-85. Триггером являлась комбинация временных совпадений сигналов счетчиков $T = (S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot S_4) \cdot A$.

Энергия квазимонохроматических электронов определялась с помощью черенковского счетчика полного поглощения ЧСПП, находящегося за S_4 [9].

Мониторинг пучка фотонов (рис. 1) было разбито на две части: систему, следящую за интенсивностью пучка, и систему, контролирующую временной интервал сброса электронного пучка на внутреннюю мишень – “растяжку”.

Система мониторинга, следящая за интенсивностью фотонного пучка, была расположена за коллиматором K_2 и представляла собой черенковский счетчик 4, находящийся непосредственно в пучке и состоящий из радиатора на основе оргстекла размером $100 \times 100 \times 8$ мм ($t = 0.025X_0$ – толщина счетчика в радиационных длинах X_0). Счетчик с двух торцов просматривал-

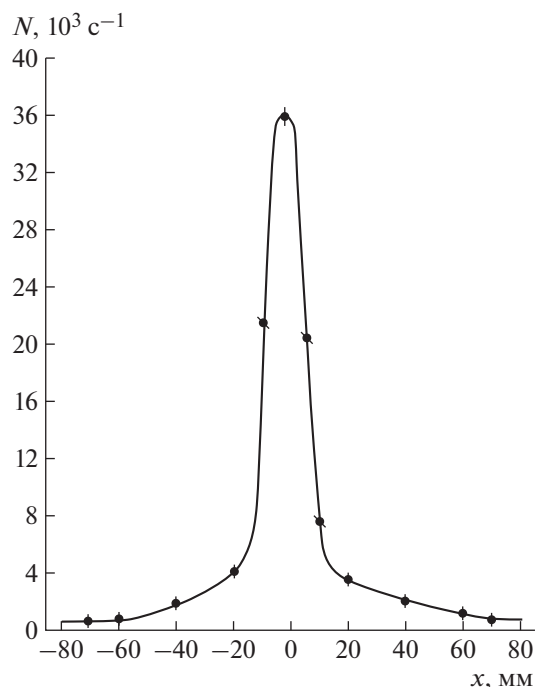


Рис. 3. Горизонтальный профиль тормозного фотонного пучка перед конвертором (0 соответствует центру конвертора).

ся двумя фотоэлектронными умножителями ФЭУ-85, по счету совпадений сигналов с которых определялась интенсивность фотонного пучка.

Система, контролирующая величину “растяжки”, являлась детектором на основе кристалла NaI(Tl) диаметром 60 и толщиной 60 мм (3). Верхняя грань детектора располагалась ниже оси пучка на расстоянии 50 мм, и детектор регистрировал фоновую составляющую часть пучка. Сигнал от детектора выводился на экран осциллографа, по длительности которого визуально определялась величина “растяжки”. В исследованиях характеристик квазимонохроматического электронного пучка длительность “растяжки” составляла 3 мс.

Горизонтальные и вертикальные профили фотонного и электронного пучков определялись в ключевых точках транспортировки: на выходе из ускорителя, на входе и выходе из очищающего магнита СП-3, на входе в магнит СП-57, а также перед входом в коллиматор K_4 (рис. 1).

Профили фотонного пучка исследовались с помощью засветки фотобумаги после поглотителя и с применением сцинтилляционных счетчиков. В последнем случае профили являлись результатом счета совпадений сигналов двух сцинтилляционных счетчиков, расположенных друг за другом по пучку на расстоянии 5 см. Ширина по пучку каждого счетчика составляла 5 мм, а высота и длина – 10 мм. Перед первым счетчиком располагался медный конвертор толщиной 0.1–5 мм.

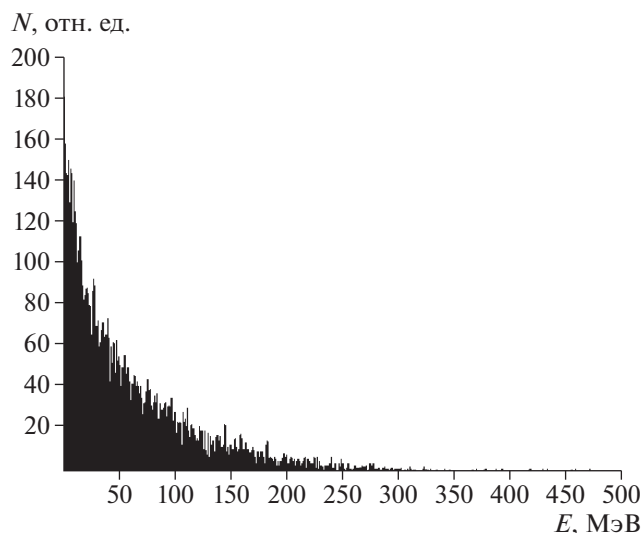


Рис. 4. Энергетический спектр тормозного фотонного пучка, измеренный ЧСПП с помощью щелевого коллиматора.

Для исследования профилей пучка использовались две платформы, на которых располагались две пары счетчиков. Платформы могли независимо дистанционно управляться из пультной комнаты. Точность перемещения составляла 0.1 мм.

На рис. 3 представлен горизонтальный профиль фотонного пучка перед конвертором при наличии коллиматора K_3 и выключенном магните СП-3. Полная ширина на половине высоты распределения составила ~ 13 мм. Коллиматор K_3 подавил фоновую часть фотонного пучка, пропустив пучок диаметром, соответствующим диаметру коллиматора K_1 .

Энергетический спектр тормозного фотонного пучка со средней энергией $\langle E_\gamma \rangle = 56$ МэВ представлен на рис. 4. Спектр получен с помощью черенковского спектрометра полного поглощения ЧСПП, помещенного на траекторию фотонного пучка за магнитом СП-57. Перед ЧСПП был расположен щелевой свинцовый коллиматор толщиной 70 мм с шириной щели 5 мм. Энергия электронов ускорителя, формирующих фотонный пучок, составляла 425 МэВ.

Интенсивность тормозного фотонного пучка измерялась с помощью квантометра [10] сразу за коллиматором K_2 и составила $\sim 1.2 \cdot 10^9$ эквивалентных фотонов/с.

Калибровка ЧСПП была выполнена на космических мюонах по методу “напролет”, представленному на вставке рис. 5. Триггером при калибровке являлся сигнал от совпадения сигналов двух одинаковых сцинтилляционных счетчиков размером $70 \times 70 \times 5$ мм, расположенных перед ЧСПП и за ним. Среднее энерговыделение в радиаторе ЧСПП на основе тяжелого стекла ТФ-1

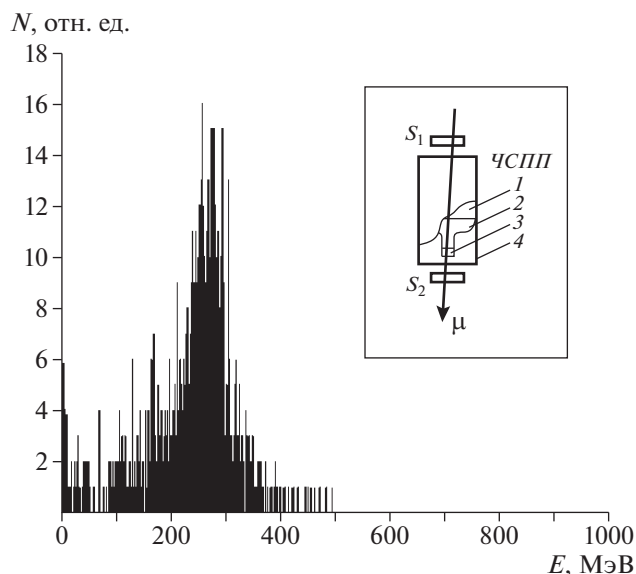


Рис. 5. Калибровочный спектр космических мюонов, измеренный ЧСПП. 1 – радиатор на основе ТФ-1; 2 – ФЭУ-49; 3 – делитель; 4 – корпус.

(плотность стекла ТФ-1 – 3.68 г/см³) и при напряжении на делителе ФЭУ-49 $U = 1600$ В составило $\langle E \rangle = 276$ МэВ. Эта энергия соответствовала значению амплитудного спектра $\langle A \rangle = 274$. Коэффициент пропорциональности, связывающий энергию, оставленную космическим мюоном в

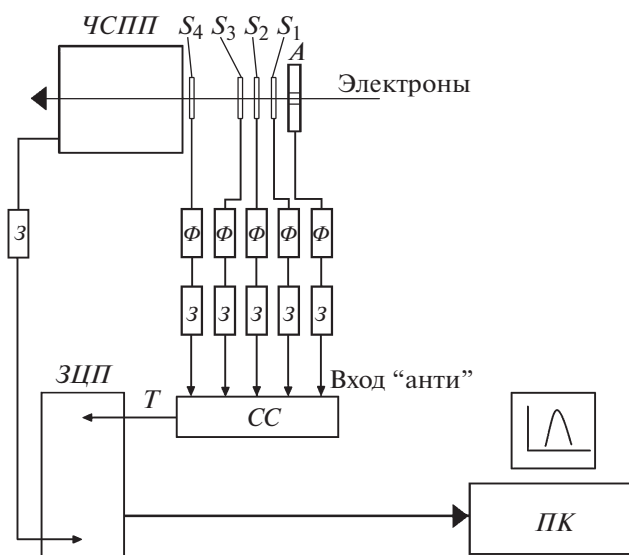


Рис. 6. Блок-схема калибровочного канала квазимонохроматического электронного пучка. З – блок задержек; Ф – формирователь со следящим порогом; ЗЦП – зарядоцифровой преобразователь; СС – 4-канальная схема совпадений; Т – триггерный сигнал; ПК – персональный компьютер.

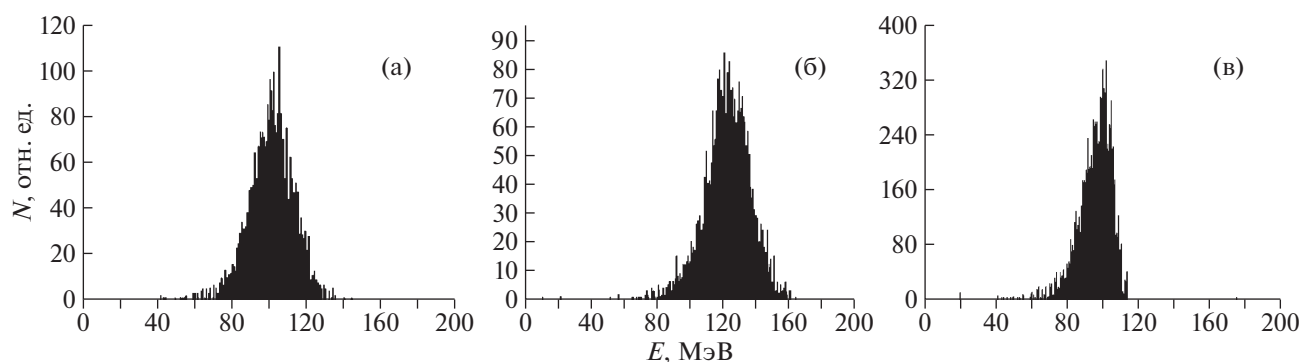


Рис. 7. Энергетические спектры квазимонохроматического электронного пучка: а — конвертор (0.1 мм меди) + “воздух” (ЧСПП); б — конвертор — “воздух” (ЧСПП); в — разность спектров (“медь + воздух” — “воздух”).

ЧСПП, и амплитуду амплитудного спектра, составил $k = \langle E \rangle / \langle A \rangle \approx 1$.

Блок-схема калибровочного канала представлена на рис. 6. Сигналы со сцинтилляционных счетчиков по коаксиальным кабелям РК-50 длиной ~ 100 м подавались из экспериментального зала в пульттовую комнату на входы формирователей со следящим порогом, которые формировали сигналы стандарта NIM длительностью 10 нс. Чтобы исключить отражение сигналов на длинных кабелях и режим “генерации”, который мог возникать в каналах формирователей при работе с пучком, пороговые напряжения формирователей были выставлены в диапазоне напряжений от 50 до 100 мВ. Сигналы со счетчиков S_1-S_4 через временные задержки подавались на 4-канальную схему совпадений СС. На вход “анти” схемы СС подавался сигнал со счетчика А. Сигнал с СС являлся основным триггерным сигналом T , с помощью которого через крейт-контролер в память персонального компьютера ПК производилась “запись” аналогового сигнала с ЧСПП.

Для питания делителей сцинтилляционных счетчиков А, S_1-S_4 использовался высоковольтный источник системы МЕЛ с разводкой питания на счетчики через делитель напряжения этой же системы. Питание делителя ФЭУ-49, использующегося в ЧСПП, осуществлялось от источника питания фирмы С.А.Е.Н.

Квазимонохроматический пучок вторичных электронов является результатом рождения фотонами электрон-позитронных пар в конверторе и взаимодействия электронов с магнитным полем, поэтому все характеристики электронного пучка должны зависеть от характеристик конвертора и магнитного поля.

Характеристики квазимонохроматического электронного пучка определялись методом разности спектров с конвертором и без него. На первом этапе исследовались основные характеристики электронного пучка, которыми являлись вели-

чина энергии, энергетическое разрешение и интенсивность фотонов в районе конвертора. На втором этапе исследовались эти же характеристики, когда конвертором являлся только воздух. В дальнейшем происходило вычитание из спектров, полученных при сложном конверторе (медь + воздух), спектров, полученных при конверторе, являющемся воздухом. В измерениях перед коллиматором K_4 находился дополнительный коллиматор 10 с отверстием $\varnothing 10$ мм (рис. 1).

На рис. 7 представлены энергетические спектры электронного пучка, зарегистрированные ЧСПП: при медном конверторе толщиной 0.1 мм плюс воздух (рис. 7а), только воздух (рис. 7б) и на рис. 7в — разность спектров, который является “истинным” спектром электронного пучка, в характе-

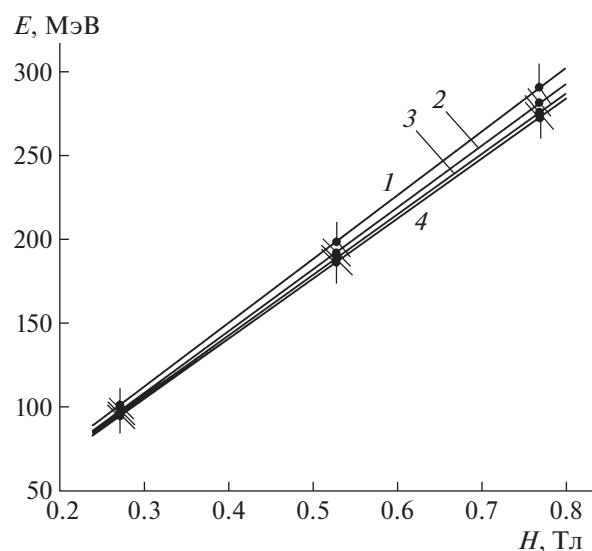


Рис. 8. Зависимость энергии квазимонохроматического электронного пучка от поля магнита СП-57. Толщина медного конвертора: 1 — 0.1 мм, 2 — 1.1 мм, 3 — 3.1 мм, 4 — 5.1 мм.

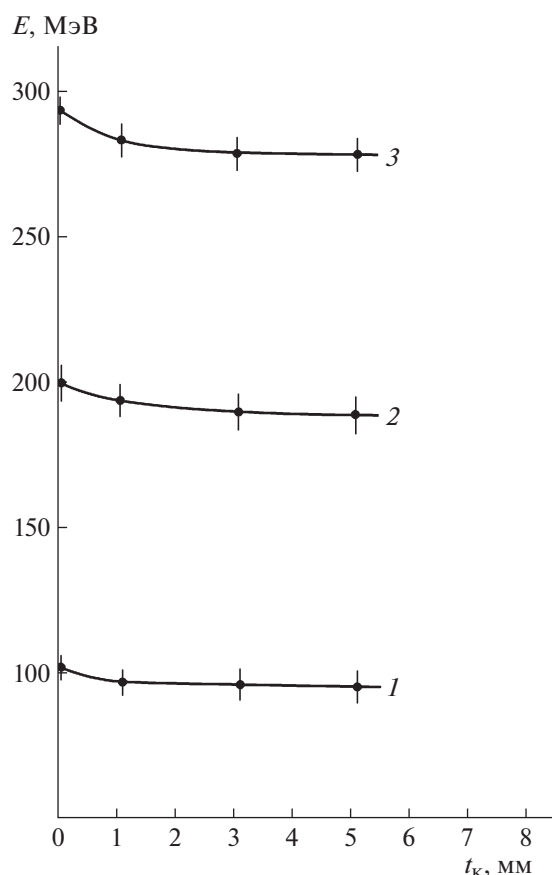


Рис. 9. Зависимость энергии квазимонохроматического электронного пучка от толщины медного конвертора. Поле магнита СП-57: 1 – 0.275 Тл, 2 – 0.527 Тл, 3 – 0.767 Тл.

ристиках которого вычтен фоновый вклад, формируемый пучком при транспортировке в воздухе.

Зависимость средней энергии квазимонохроматического электронного пучка от поля СП-57 и толщины медного конвертора представлены на рис. 8. Видно, что зависимость средней энергии зарегистрированных электронов от магнитного поля СП-57 пропорциональна. Это связано с тем, что изменение магнитного поля пропорционально ведет к изменению угла отклонения электронов и фактически происходит сканирование непрерывного распределения электронов по энергии отверстием коллиматора. Видно также, что с увеличением толщины конвертора величина средней энергии пучка электронов падает. Можно предположить, что это происходит за счет потери энергии и многократного кулоновского рассеяния электронов в конверторе.

Рис. 9 более детально показывает, что с увеличением толщины конвертора при всех исследованных значениях поля СП-57 средняя энергия пучка электронов уменьшается.

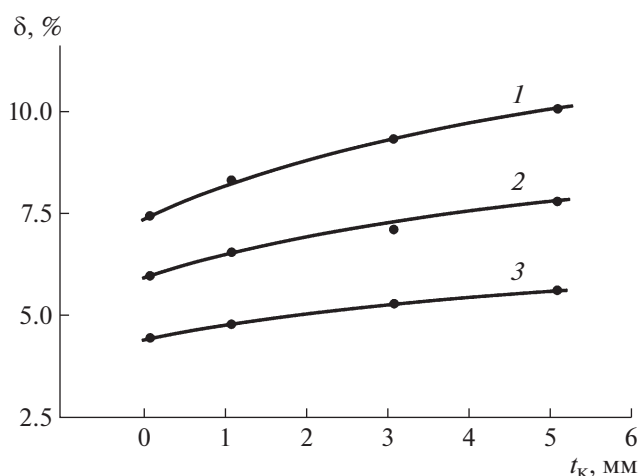


Рис. 10. Зависимость относительного энергетического разрешения квазимонохроматического электронного пучка от толщины медного конвертора. Поле магнита СП-57: 1 – 0.275 Тл, 2 – 0.527 Тл, 3 – 0.767 Тл.

На рис. 10 представлены зависимости относительного энергетического разрешения электронного пучка от толщины конвертора и величины магнитного поля СП-57. Видно, что с увеличением магнитного поля относительное энергетическое разрешение электронного пучка улучшается, поскольку увеличивается абсолютная величина энергии электронов, попадающих в апертуру дополнительного коллиматора 10 перед K_4 (рис. 1). С другой стороны, увеличение толщины конвертора ведет к ухудшению разрешения, поскольку увеличиваются “сэмплинг” флуктуации, связанные с толщиной поглотителя. Систематическая ошибка, входящая в величины относительного

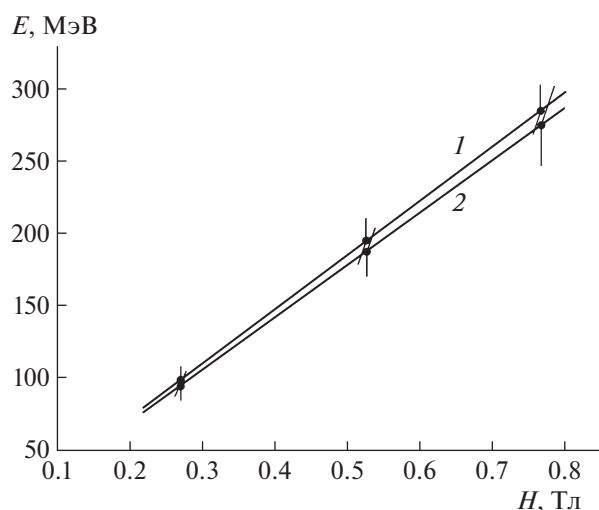


Рис. 11. Зависимость энергии квазимонохроматического электронного пучка от поля магнита СП-57. Конвертор из 1 мм меди: 1 – эксперимент, 2 – расчет по программе GEANT4.

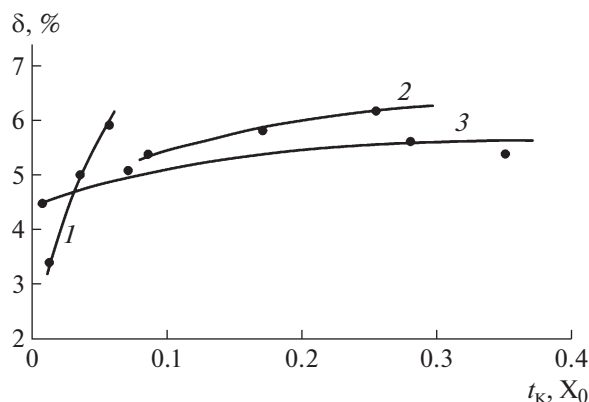


Рис. 12. Зависимость относительного энергетического разрешения квазимонохроматического электронного пучка от толщины и типа вещества конвертора: 1 – алюминий ($H_{СП-57} = 0.766$ Тл); 2 – железо ($H_{СП-57} = 0.766$ Тл); 3 – медь ($H_{СП-57} = 0.767$ Тл).

энергетического разрешения электронного пучка (рис. 10), составила $\sim 1\%$ и определяется в основном режимом формирования фотонного пучка первичным электронным пучком на внутренней мишени ускорителя.

С помощью GEANT4 было проведено моделирование прохождения электронов от точки конверсии в медном конверторе толщиной 1 мм до его регистрации счетчиками S_1 – S_4 и ЧСПП. Расчетная зависимость энергосвечения электронов в веществе ЧСПП (без учета других деталей, влияющих на энергетическое разрешение ЧСПП – светосбор, эффективность ФЭУ и пр.) и экспериментальная зависимость энергии пучка от поля СП-57 представлены на рис. 11, который показывает, что обе зависимости в пределах ошибок совпадают, различие составляет $\sim 3\%$.

Была исследована зависимость относительного энергетического разрешения электронного пучка от типа и толщины конвертора. Были исследованы конверторы из алюминия (Al, $X_0 = 8.9$ см, кривая 1, рис. 12), железа (Fe, $X_0 = 1.76$ см, кривая 2) и меди (Cu, $X_0 = 1.43$ см, кривая 3) [11]. Из рис. 12 видно, что наилучшее энергетическое разрешение для данной системы формирования электронного пучка может быть достигнуто при тонком алюминиевом конверторе ($t_{Al} \approx 0.05X_0$ или 4.5 мм) и составит $\delta \sim 3\%$. Использование конвертора из железа практически не дает преимуществ перед конвертором из меди.

Зависимость интенсивности электронного пучка при триггере $T = (S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot S_4) \cdot A$ от толщины конвертора и поля магнита СП-57 представлена на рис. 13. Видно, что интенсивность во всем исследованном диапазоне значений поля может меняться от 1 до 5 Гц. Для увеличения интенсивности был “смягчен” триггер $T = (S_1 \cdot S_2 \cdot S_3) \cdot A$, что позволило увеличить интенсивность до ~ 20 Гц при ухуд-

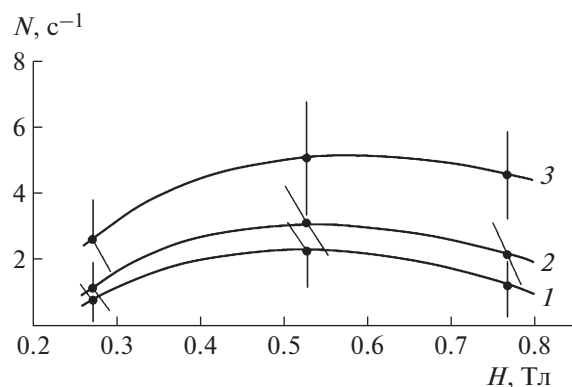


Рис. 13. Зависимость интенсивности квазимонохроматического электронного пучка от поля магнита СП-57. Толщина медного конвертора: 1 – 1.1 мм, 2 – 3.1 мм, 3 – 5.1 мм.

шении относительного энергетического разрешения на $\sim 5\%$. Исключение дополнительного коллиматора 10 перед K_4 с диаметром отверстия 30 мм (рис. 1) дало возможность увеличить интенсивность до ~ 60 Гц, однако относительное энергетическое разрешение ухудшилось на $\sim 20\%$ и в амплитудном спектре ЧСПП в области высоких амплитуд появились значения, характеризующие наложение сигналов.

В заключение можно отметить, что созданный на базе ускорителя “Пахра” ФИАН калибровочный квазимонохроматический пучок вторичных электронов имеет хорошие характеристики и может быть использован для калибровки экспериментальной аппаратуры и других исследований.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы “Фундаментальные исследования” Президиума Российской академии наук.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://nica.jinr.ru>
2. http://nica.jinr.ru/files/BM@N/BMN_CDR.pdf
3. <https://relnp.jinr.ru/ishepp-xxiii/Presentations/Dryablov.pdf>
4. <http://gamma400.lebedev.ru>
5. <https://mu2e.fnal.gov/>
6. http://sites.lebedev.ru/OFVE/show.php?page_id=2793
7. Бессонов Е.Г., Малиновский Е.И., Субботин Г.Г. Препринт ФИАН № 28. М., 2006.
8. http://x4u.lebedev.ru/phys_work/Set_test_beam.htm
9. Басков В.А., Белоусов А.С., Ким В.В., Малиновский Е.И., Усик А.П., Хабло В.А. // ПТЭ. 2011. № 5. С. 66.
10. Комар А.П., Круглов С.П., Лопатин И.В. Измерение полной энергии пучков тормозного излучения от электронных ускорителей. Л.: Наука, 1972.
11. Калиновский А.Н., Мохов Н.В., Никитин Ю.П. Прохождение частиц высоких энергий через вещество. М.: Энергоатомиздат, 1985.