

Пучок электронов с импульсами до 46 Гэв/с на Серпуховском ускорителе

ГЕРШТЕЙН С. С., САМОЙЛОВ А. В., САПУНОВ Ю. М., ФРОЛОВ А. М., АЛИХАНИЯН А. И.,
 БАЯТЯН Г. Л., ВАРТАНЯН Г. С., КЗЯНЯН С. Г., МАРГАРЯН А. Т., БЕЛОУСОВ А. С.,
 БУДАНОВ Н. П., ГОВОРКОВ Б. Б., МИНАРИК Е. В., РУСАКОВ С. В., ТАММ Е. И.,
 ЧЕРЕНКОВ П. А., ШАРЕЙКО П. Н.

УДК 621.384.635.5/6

Протонные ускорители позволяют получать частицы с энергиями, в десятки раз превышающими энергии, которые можно получить на ускорителях электронов. Поэтому протонные ускорители можно использовать для создания электронных пучков такой энергии, которая для электронных ускорителей пока не достижима. Создание таких пучков открывает широкие возможности для расширения экспериментальных исследований по физике электромагнитных взаимодействий в область высоких энергий.

Основным процессом генерации электронов (позитронов) на протонных ускорителях является конверсия фотонов от распада π^0 -мезонов, рождаемых в мишени протонами ($\pi^0 \rightarrow 2\gamma$, $\gamma \rightarrow e^+e^-$). Потоки γ -квантов, возникающих в мишенях протонных ускорителей, можно оценить на основании известных величин поперечных сечений образования пионов протонами. Теоретические оценки, выполненные для Серпуховского протонного синхротрона с энергией 70 Гэв [1—3], а также для протонного ускорителя на энергию 500 Гэв в Батейвии (США) [4], показали, что эти ускорители могут быть достаточно интенсивными источниками электронов высоких энергий.

Настоящая работа посвящена реализации этой идеи на Серпуховском ускорителе, где впервые был получен пучок электронов с энергией до 45,5 Гэв, которая более чем вдвое превышает энергии наиболее мощных современных электронных ускорителей.

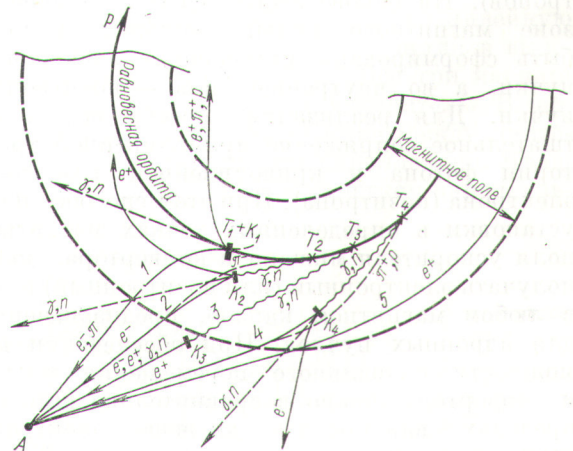
Электронные пучки планируют создать на протонном ускорителе Национальной ускорительной лаборатории США в Батейвии, а также на строящемся протонном ускорителе на энергию 300 Гэв в ЦЕРНе. Сверхмощные протонные ускорители будут, по-видимому, единственными источниками электронных (позитронных) пучков в области энергии на сотни и тысячи гигаэлектронвольт.

Очевидным способом создания интенсивных чистых электронных пучков является конвертирование фотонов с мишени, которая установлена в пучке выведенных из ускорителя первичных протонов. Однако для осуществления такого способа требуется специальный канал

для работы с электронным пучком, что представляет сложную задачу для действующих ускорителей.

На Серпуховском ускорителе усилия объединенной группы сотрудников ИФВЭ, ФИАН и Ереванского ФИ были направлены на поиск эффективных практических способов создания пучков электронов с использованием внутренних мишеней, размещаемых в магнитном поле ускорителя [5].

При использовании внутренних мишеней возможны три способа генерации конверсионных электронов (позитронов). Эти способы представлены на рис. 1. В первом способе (трасса 1) конверсия фотонов происходит в той же мишени, где генерируются π^0 -мезоны. В этом случае электроны составляют лишь малую, не превышающую нескольких процентов примесь в пучке заряженных адронов с мишени [5—7]. Незначительное увеличение этой примеси возможно при использовании мишени, состоящей из смеси легкого и тяжелого веществ [5]. Эксперименты в таких смешанных пучках требуют выделения электронов на большом фоне адронов. Второй способ (трасса 3)



Р и с. 1. Способы генерации электронных и позитронных пучков в точку во внешней зоне магнитного кольца ускорителя на основе использования внутренних мишеней (угол образования γ -квантов $\theta_\gamma = 0^\circ$, T — мишень, K — конвертор, трассы 1 и 5 — граничные для возможных выводов электронов или позитронов в точку A).

основан на использовании выведенного из ускорителя нейтрального пучка с мишени и позволяет сформировать чистый электронный пучок [1]. Однако для этого необходимо создать специальный магнитный канал. Кроме того, этот способ ввиду протяженной трассы нейтрального пучка в ускорителе не позволяет реализовать наибольший аксептанс магнитного канала. В ИФВЭ для создания чистых электронных (позитронных) пучков был предложен способ, основанный на пространственном разнесении мишени и конвертора в магнитном поле ускорителя (трассы 2, 4), свободный от недостатков указанных способов [5].

При использовании мишени и конвертора, пространственно разнесенных в магнитном поле ускорителя, на вход магнитного канала, в котором формируется электронный (позитронный) пучок, попадают также и заряженные адроны с мишени (см. рис. 1). Однако импульсы электронов и адронов в общем случае различны, поэтому адроны выводятся из канала его магнитным анализатором. В сформированном пучке будет присутствовать лишь примесь заряженных адронов, генерированных в конверторе при условиях, идентичных с условиями захвата в канал электронов (позитронов). Очевидно, такая примесь в пучках электронов будет значительно меньше, чем в пучках позитронов.

Предложенный способ позволяет независимо выбирать оптимальные параметры мишени и конвертора для получения максимально возможной плотности потока электронов (позитронов). На основе этого способа во внешней зоне магнитного кольца ускорителя могут быть сформированы интенсивные электронные пучки, а во внутренней зоне — позитронные пучки. Для реализации способа необходимо тщательное сопряжение прямолинейной траектории фотона и криволинейной траектории электрона (позитрона). При этом способе, после установки в определенных точках магнитного поля ускорителя мишени и конвертора, можно получать электронный (или позитронный) пучок в любом магнитном канале, предназначенном для адронных пучков. При обеспечении возможности радиального перемещения мишени и конвертора можно в сравнительно широких пределах варьировать энергию электронов (или позитронов) в канале во внешней (или внутренней) зоне магнитного кольца при неизменной энергии ускоренных протонов.

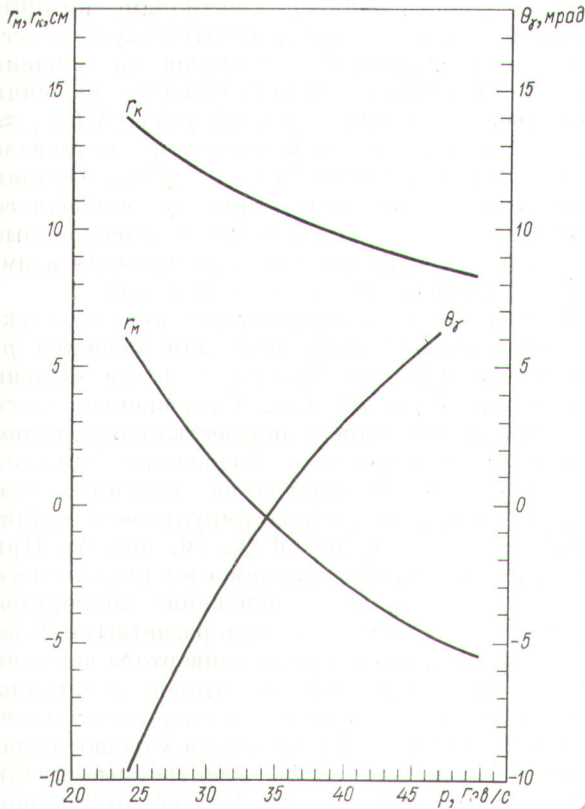
Электронный пучок на Серпуховском ускорителе был получен на основе описанного

способа в конце 1971 г. в магнитном канале № 2Б. Канал создан на внешних по отношению к ускорителю экспериментальных площадях для формирования и транспортировки пучков отрицательно заряженных адронов с импульсами до 60 Гэв/с [8, 9].

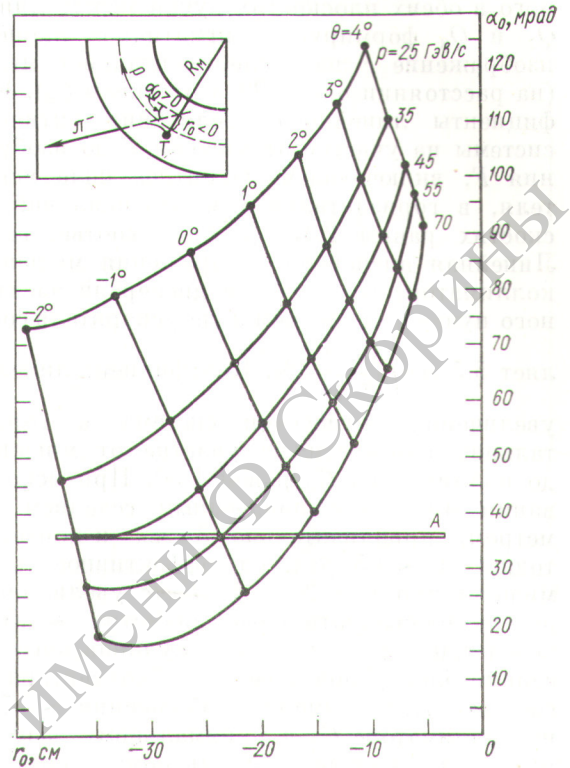
Для генерации фотонов в 24-м магнитном блоке ускорителя была установлена специальная мишень. Свинцовый конвертор был размещен на расстоянии около $6,64 \text{ м}$ от мишени по направлению циркуляции протонного пучка.

Вертикальный и радиальный размеры конвертора были равны 60 и 70 мм . Основные положения мишени и конвертора выбраны так, чтобы при захвате в канал электронов с импульсом $p = 35 \text{ Гэв/с}$ конвертор облучался фотонами, образованными под углом $\theta_\gamma = 0^\circ$ (θ — угол рождения частиц) при энергии ускоренных протонов $E_0 = 70 \text{ Гэв}$. Радиальные перемещения мишени и конвертора в ускорителе позволяют варьировать импульсы вводимых в канал электронов в интервале $p = 26 \div 46 \text{ Гэв/с}$ (рис. 2). Однако условия генерации электронов с $p \neq 35 \text{ Гэв/с}$ не являются оптимальными, так как в этих случаях $\theta_\gamma \neq 0^\circ$. Ввод в канал электронов с $p < 26 \text{ Гэв/с}$ осуществляется при пониженной энергии ускорения.

На рис. 3 приведена так называемая диаграмма Михаэлиса для траекторий отрицательно заряженных частиц, рожденных в мишени и выведенных из ускорителя. Варьируемыми параметрами на ней являются θ и p . На диаграмму наложен горизонтальный аксептанс канала A для электронного пучка с конвертора, приведенный к азимутальной координате мишени в ускорителе. Этот аксептанс мало меняется во всем диапазоне импульсов электронов $p \approx 26 \div 46 \text{ Гэв/с}$. Из диаграммы видно, что в сформированном электронном пучке при $p \approx 26 \div 40 \text{ Гэв/с}$ не должно быть примеси адронов, рожденных в мишени. При $p > 40 \text{ Гэв/с}$ в пучке можно ожидать появления адронной примеси с мишени ($< 10\%$). Очистке электронного пучка от адронов с мишени способствует различный характер фокусировки этих частиц в магнитном поле ускорителя: положения и характеристики виртуальных источников для выведенных из ускорителя электронов и адронов различны. Выведенный из ускорителя электронный пучок имеет в вертикальной плоскости мнимый источник, расположенный на расстоянии около 13 м от первой квадрупольной линзы канала № 2Б, а в



Р и с. 2. Радиальные положения мишени r_m и конвертора r_k относительно равновесной орбиты протонов в ускорителе и угол образования фотонов в мишени θ_γ в функции от импульса p конверсионных электронов в канале № 2Б (r и θ положительные при смещениях и угловых отклонениях относительно равновесной орбиты во внешнюю зону магнитного кольца ускорителя, $E_0 = 70$ Гэв).

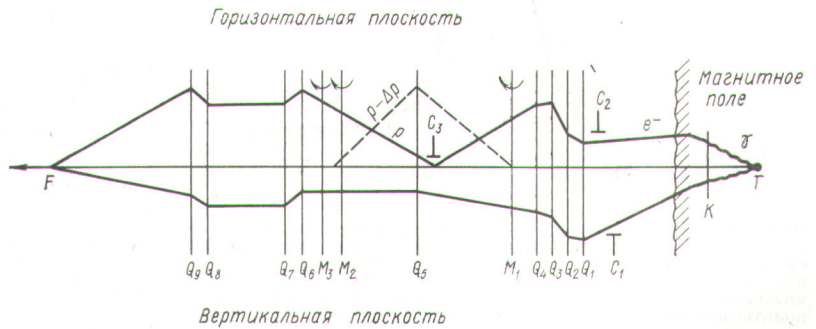


Р и с. 3. Диаграмма траекторий в зоне канала № 2Б для отрицательно заряженных частиц, рожденных в мишени-источнике фотонов при $E_0 = 70$ Гэв (A — горизонтальный акцептанс канала для электронов с конвертора).

горизонтальной плоскости этот пучок имеет очень малую угловую расходимость.

Электронный пучок был сформирован по оптической схеме, представленной на рис. 4. На входе в канал пучок ограничивается апертурными коллиматорами C_1 и C_2 . Дублет из четырех квадрупольных линз $Q_1 - Q_4$ создает в горизонтальной плоскости изображение конвертора на коллиматоре C_3 , а в вертикальной плоскости формирует пучок, сходящийся за линзой Q_5 . Отклоняющий магнит M_1 диспергирует изображение мишени на коллиматоре C_3 по импульсу частиц. Коллиматор C_3 выделяет частицы в необходимом интервале значений их импульса $p \pm \Delta p$. Полевая линза Q_5 и отклоняющие магниты M_2, M_3 уменьшают линейную и угловую дисперсии пучковых частиц в выделенном интервале импульсов. Все три магнита $M_1 - M_3$ отклоняют пучок к ускорителю. В вертикальной плоскости на участке между линзами Q_5 и Q_6 пучок проходит параллельно. Квадруплет линз $Q_6 Q_7 - Q_8 Q_9$ с участком параллель-

но идущим магнитам M_2, M_3 уменьшают линейную и угловую дисперсии пучковых частиц в выделенном интервале импульсов. Все три магнита $M_1 - M_3$ отклоняют пучок к ускорителю. В вертикальной плоскости на участке между линзами Q_5 и Q_6 пучок проходит параллельно. Квадруплет линз $Q_6 Q_7 - Q_8 Q_9$ с участком параллель-



Р и с. 4. Оптическая схема формирования электронного пучка в канале № 2Б.

ного в обеих плоскостях пучка между линзами Q_7 и Q_8 формирует стигматичное окончное изображение F на экспериментальной мишени (на расстоянии около 29 м от линзы Q_8). Коэффициенты линейного увеличения оптической системы на участке от мишени T до изображения F , включающем магнитное поле ускорителя, в горизонтальной и вертикальной плоскостях равны 2,15 и 6,60 соответственно. Линейная дисперсия изображения мишени на коллиматоре C_3 с учетом дисперсии электронного пучка в магнитном поле ускорителя составляет $5,5 \text{ мм} / \frac{\Delta p}{p} = 1\%$. Коэффициент линейного

увеличения оптической системы в горизонтальной плоскости на участке от мишени T до коллиматора C_3 равен 1,30. При использовании мишени с поперечным сечением (диаметром) приблизительно 3 мм и конвертора толщиной $\sim 0,5$ рад. ед. эффективное сечение мишени при $p = 26 \div 46 \text{ Гэв/с}$ увеличивается до среднеквадратичного диаметра $\sim 4,5 \text{ мм}$ вследствие многократного кулоновского рассеяния электронов в веществе конвертора. Это соответствует размеру изображения $\sim 5,7 \text{ мм}$ на коллиматоре C_3 и минимальному разрешаемому в канале импульсному интервалу $(\Delta p/p)_{\text{мин}} \approx 1\%$. В окончном изображении в горизонтальной плоскости остается нескомпенсированной линейная дисперсия $4,2 \text{ мм} / \frac{\Delta p}{p} =$

$= 1\%$. Конверсионным электронам, которые захватываются в канал, соответствует телесный угол образования фотонов на мишени $\Delta\Omega_\gamma \approx 40 \text{ мкстер}$ для центрального значения импульса и средний телесный угол $(\Delta\Omega_\gamma)_{\text{ср}} \approx 27 \text{ мкстер}$ в максимальном интервале импульсов электронов $\Delta p/p = \pm 3\%$. Полная длина пучка от конвертора до окончного изображения составляет $\sim 118 \text{ м}$. Электронные пучки могут быть растянуты во времени в импульсе длительностью до $\tau \approx 2 \text{ сек}$.

Исследования характеристик пучков электронов в канале выполнены для значений p , равных 26,6; 31; 40; 45,5 Гэв/с , и при энергии ускорения $E_0 = 70 \text{ Гэв}$. Сопряжение трасс фотонов и электронов осуществлялось путем вариации радиального положения мишени в ускорителе до получения максимального потока частиц на выходе импульсного анализатора канала (за линзой Q_7 , см. рис. 4). При этом режимы оптических элементов импульсного анализатора канала и положение конвертора в ускорителе устанавливались расчетными. Следует отметить, что площадь конвертора выбрана несколько больше той, с которой электроны захватываются в канал. Экспериментальные положения мишени и конвертора хорошо согласуются с рассчитанными. Электронные пучки в канале при $\Delta p/p = \pm 3\%$ формируются в окончном изображении в пятно диаметром $\sim 30 \text{ мм}$ при угловой расходимости приблизительно $\pm 1 \text{ мрад}$ (рис. 5). Большую часть пути электроны транспортируются в вакууме.

Состав пучков определяли с помощью телескопа сцинтилляционных счетчиков в канале и черенковского спектрометра полного поглощения. Спектрометр имел радиатор толщиной 22 рад. ед. Зависимость амплитуды импульсного спектрометра от энергии регистрируемых электронов была линейной, энергетическое разрешение во всем рабочем диапазоне энергий было не хуже 5% (полная ширина пика на половине высоты).

Электроны оставляют в радиаторе спектрометра значительную часть своей энергии (за счет образования ливней), тогда как адроны теряют в радиаторе лишь небольшую часть энергии (на ионизацию). Поэтому разделение электронов и адронов осуществлялось по амплитудному анализу импульсов черенковского спектрометра.

Широкий диапазон измерения энергии обеспечивался путем изменения амплитуды импульса от спектрометра. При $p = 26 \div 40 \text{ Гэв/с}$

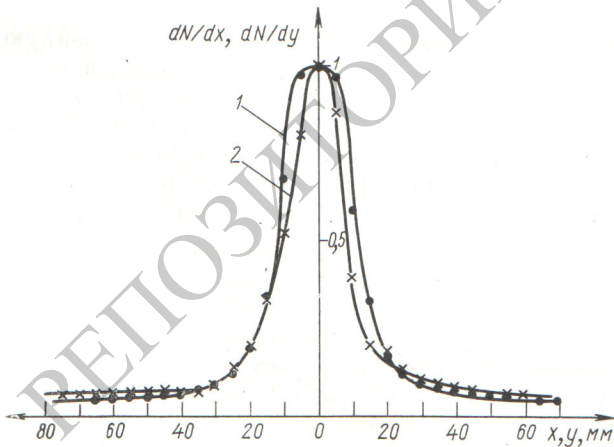
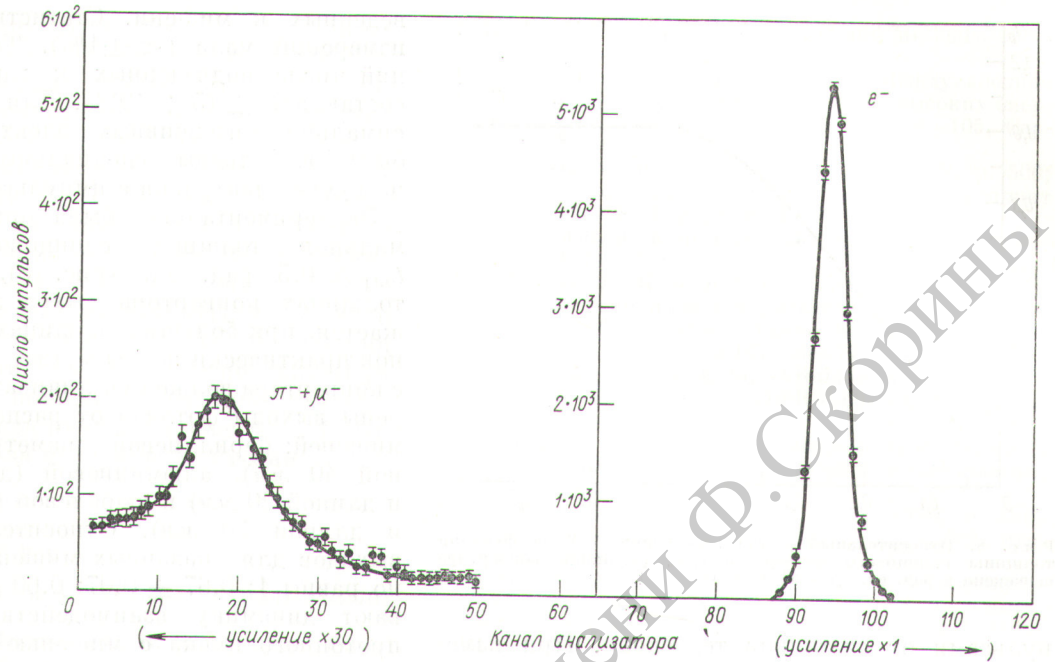


Рис. 5. Вертикальный (1) и горизонтальный (2) профили электронного пучка в окончном изображении в канале № 2Б (мишень диаметром 2 мм, свинцовый конвертор толщиной 0,5 рад. ед., $E_0 = 70 \text{ Гэв}$, $p = 31 \text{ Гэв/с}$, $\Delta p/p = \pm 3\%$, N — интенсивность, x, y — горизонтальная и вертикальная координаты относительно оси пучка).

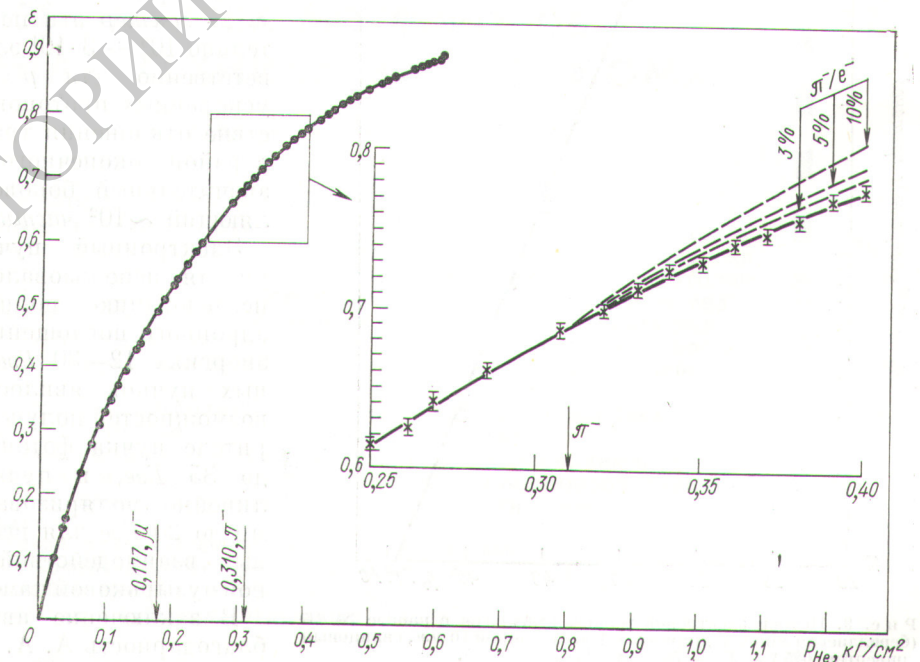


Р и с. 6. Спектр амплитуд импульсов черенковского спектрометра полного поглощения в пучке электронов с $p = 45,5$ Гэв/с в канале № 2Б ($E_0 = 70$ Гэв, $\Delta p/p = \pm 2\%$).

примесь адронов и мюонов в электронном пучке оказалась меньшей 1%, а при $p = 45,5$ Гэв/с она составила 3,6%. Характерные спектры амплитуд импульсов от черенковского спектрометра для адронов и электронов показаны на рис. 6. Контрольные измерения примеси пионов и мюонов в электронном пучке с импульсом $p = 31$ Гэв/с были проведены также с помощью порогового газового черенковского счетчика [10]. Как и в предыдущих измерениях, эта примесь не превышала 1% потока электронов в канале (рис. 7).

В таких измерениях импульсы от спектрометра через интегральный дискриминатор типа SAIP-VDI/21 с быстродействием 100 Мгц регистрировались в совпадении с им-

Потоки электронов измерялись тем же спектро-



Р и с. 7. Эффективность регистрации частиц пороговым газовым черенковским счетчиком ϵ в пучке электронов с $p = 31$ Гэв/с в канале № 2Б как функция давления рабочего газа P_{He} ($E_0 = 70$ Гэв, $\Delta p/p = \pm 3\%$).

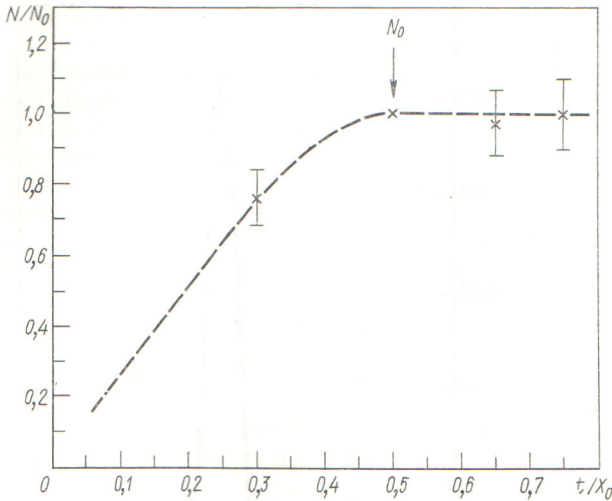


Рис. 8. Относительный выход электронов N/N_0 в функции толщины свинцового конвертора t/X_0 (толщина конвертора выражена в рад. ед., $p = 31$ Гэв/с).

пульсами от счетчиков телескопа. При измерении потоков электронов одновременно регистрировалось число ускоренных протонов, под-



Рис. 9. Потоки электронов разных импульсов в канале № 2Б (бериллиевая мишень диаметром 3 мм и длиной 40 мм, свинцовый конвертор $0,5X_0$, $E_0 = 70$ Гэв, $\Delta p/p = \pm 3\%$).

веденных к мишени. Статистическая ошибка измерений мала ($< \pm 1\%$). Точность измерений числа подведенных к мишени протонов составляла $\pm (5 \div 10)\%$. Для получения максимально интенсивных электронных пучков были выполнены специальные исследования на пучке электронов с импульсом $p = 31$ Гэв/с.

Экспериментально была определена оптимальная толщина свинцового конвертора $t_{\text{опт}} \approx 0,5$ рад. ед. (рис. 8). При меньших толщинах конвертора выход электронов снижается, при больших толщинах выход электронов практически не возрастает, а поток адронов с конвертора должен увеличиваться. Были измерены выходы фотонов от распада $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ для мишеней: бериллиевой (диаметром 3 мм и длиной 40 мм), алюминиевой (диаметром 2 мм и длиной 20 мм) и дюралевой (диаметром 2 мм и длиной 50 мм). Относительные значения выходов для указанных мишеней соответственно равны 1; $0,67 \pm 0,07$; $0,60 \pm 0,06$ и учитывают динамику взаимодействия ускоренного протонного пучка с мишенью при многократном прохождении через нее протонов. Отметим, что эффективность ядерного взаимодействия протонного пучка с алюминиевой мишенью при медленном наведении на нее протонов составляет $\sim 0,4$ [11]. Потоки электронов в канале № 2Б были измерены для бериллиевой мишени диаметром 3 мм и длиной 40 мм и свинцового конвертора толщиной 3 мм (0,5 рад. ед.). В интервале $\Delta p/p = \pm 3\%$ при $(\Delta\Omega_\gamma)_{\text{ср}} \approx 27$ мкстер эти потоки составили приблизительно $10^6 \div 3 \cdot 10^4$ электронов в импульсе соответственно для $p = 26 \div 46$ Гэв/с на 10^{12} ускоренных протонов (рис. 9). При этом вследствие отклонения траектории канала к ускорителю в районе оконечного изображения наблюдался значительный боковой мюонный фон, составляющий $\sim 10^2$ частиц/см².

Электронный пучок Серпуховского ускорителя использовался для экспериментов по исследованию полных поперечных сечений адронного поглощения фотонов нуклонами при энергиях 12—30 Гэв [12]. Создание электронных пучков явилось основой для изучения возможностей получения на Серпуховском ускорителе пучка фотонов, «меченных» по энергии до 35 Гэв, и пучка квазимонохроматичных линейно поляризованных фотонов с энергиями до 20 Гэв для исследования электромагнитных взаимодействий в двухметровой водородной пузырьковой камере «Людмила» (ОИЯИ) [13].

В заключение авторы выражают глубокую благодарность А. А. Логунову, А. А. Наумову,

Ю. Д. Прокошкину, В. А. Ярбе, Р. М. Суляеву, В. И. Котову и С. П. Денисову (ИФВЭ) за постоянное внимание, действенную поддержку и помощь на всех этапах создания Серпуховского электронного пучка. Авторы признательны А. Л. Жадкевичу, В. Г. Рогозинскому, Н. М. Тараканову, В. П. Сахарову, Р. С. Шувалову (ИФВЭ), П. А. Зайцеву, Н. Г. Котельникову, Е. И. Малиновскому, В. П. Плаксину, В. П. Финогенову, И. В. Михайлову, В. И. Сергиенко, В. Г. Долгалеву (ФИАН), Г. А. Аюнджанову, Л. С. Багдасаряну, О. М. Винницкому, К. А. Испиряну, Г. А. Оганесяну (Ереванский ФИ) за помощь на различных этапах реализации проекта пучка, а также З. Г. Т. Киракосяну (США) за полезные дискуссии.

Поступила в Редакцию 28/XII 1972 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алиханян А. И. и др. Препринт ЕрФИ-Э4-1(70), Ереван, 1970.
2. Макеев В. В., Фоломешкин В. Н. Препринт ИФВЭ 71—51, Серпухов, 1971.
3. Белоусов А. С. и др. Препринт ФИАН 71, М., 1970.

4. Halliwell C. e.a. Nucl. Instrum. and Methods, 1972, v. 102, p. 51.
5. Алиханян А. И. и др. Доклад на Международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий (Дубна, 1970); препринт ИФВЭ 70—105, Серпухов, 1970.
6. Бинон Ф. и др. Phys. Lett., 1969, v. 30B, p. 506; «Ядерная физика», 1970, т. 11, с. 3; препринт ИФВЭ 69—78, Серпухов, 1969.
7. Качанов В. А. и др. Препринт ИФВЭ 71—89, Серпухов, 1971.
8. Губриенко К. И. и др. В кн.: Тр. VII Международной конференции по ускорителям высоких энергий (Ереван, 1969). Ереван, Изд-во АН АрмССР, 1970, т. I, с. 471; препринт ИФВЭ 69—77, Серпухов, 1969.
9. Александров П. А. и др. «Атомная энергия», 1970, т. 29, с. 29; препринт ИФВЭ 69—36, Серпухов, 1969.
10. Denisov S. e.a. Nucl. Instrum and Methods, 1970, v. 85 p. 101; «Приборы и техника эксперимента», 1970, № 3, с. 117.
11. Бушнин Ю. Б. и др. Phys. Lett., 1969, v. 29B, p. 48; «Ядерная физика», 1969, т. 10, с. 585; препринт ИФВЭ 69—18, Серпухов, 1969.
12. Белоусов А. С. и др. Доклад, представленный на XVI Международную конференцию по физике высоких энергий в Батевии (США); препринт ФИАН 19, М., 1973.
13. Балдин А. М. и др. Препринт ОИЯИ-ФИАН-ИФВЭ P1-6212, Дубна, 1972.

Подписывайтесь на ежемесячный сборник переводных материалов «АТОМНАЯ ТЕХНИКА ЗА РУБЕЖОМ» (Индекс 70025)

Журнал информирует о достижениях атомной науки и техники за рубежом. Публикует переводы, обзоры, рефераты и материалы справочного характера (сводные таблицы, патенты и т. п.) по важнейшим отраслям техники: ядерные реакторы; атомные электростанции; химия и металлургия ядерных реакторных материалов; производство радиоактивных изотопов и применение их в промышленности, сельском хозяйстве, биологии и медицине; дозиметрия и защита от радиоактивных излучений; утилизация радиоактивных отходов. Печатает также статьи и обзоры по отдельным вопросам ядерной физики (управляемые термоядерные реакции, каталитический синтез).

В специальном разделе «Краткие сообщения» освещает вопросы научного, технического, экономического и военного характера.

Журнал рассчитан на широкие круги читателей — физиков, химиков, геологов, работников атомной, электротехнической, приборостроительной, металлургической и других отраслей промышленности, преподавателей вузов и школ, студентов.

Подписка на журнал принимается общественными распространителями печати, в пунктах подписки «Союзпечати» по месту работы и учебы, в агентствах «Союзпечати», а также в любом почтамте и отделении связи.

Подписная цена на год 6 руб.; цена отдельного номера 50 коп.