

C 3450

332/1-71

M-925
СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна



1 - 5430

С.В. Мухин, И.Н. Семенюшкин

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА
ДЛЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА
ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1970

1 - 5430

С.В. Мухин, И.Н. Семенюшкин

МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА
ДЛЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА
ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

При проектировании магнитооптической системы транспортировки пучка для электродинамического сепаратора частиц высоких энергий ЛВЭ/1/ необходимо было учесть ряд требований, связанных как с получением интенсивного пучка частиц нужного импульса, так и возможным расположением элементов магнитной оптики, отклоняющего устройства и др. Поскольку был принят вариант разделения частиц по массам в горизонтальной плоскости с одной ступенью очистки, особенно жесткие требования предъявлялись к размерам пучка в этой плоскости в месте, где проводилось пространственное разделение сепарируемых частиц. Считалось необходимым обеспечить размеры изображения пучка в этом месте, по крайней мере в 5 раз меньшие, чем величина разделения частиц.

Предварительный анализ этих требований для пучка частиц с импульсом 5 Гэв/с показал следующее.

1. Положение мишени по радиусу и азимуту при условии нулевого угла вылета частиц из нее должно быть в районе $R = 28,07 + 28,15$ мм в конце первого квадранта магнита синхрофазотрона. При этом также можно удовлетворить требованиям системы вывода ускоренного пучка на мишень, основанной на создании азимутальной асимметрии магнитного поля ускорителя^{/2/}, и обеспечить однократное прохождение ускоренных частиц через мишень.

2. При выбранном положении метровой жидководородной пузырьковой камеры в конце канала импульсный анализ, компенсация дисперсии и поворот сепарированных частиц в сторону камеры могут быть осуществлены с помощью трех магнитов, угол поворота частиц в которых составляет соответственно 11° , 16° , 5° .

3. Для формирования пучка частиц целесообразно использовать триплеты квадрупольных линз с включением их по схеме ДФД в горизонтальной плоскости.

4. При выбранных параметрах отклоняющего устройства^{/3/} для частиц с импульсом 5 Гэв/с положение его центра находится на расстоянии 58 м от мишени и для разделения частиц по массам достаточно расстояния 27 м от центра отклоняющего устройства.

Схема расположения элементов канала вторичных частиц с импульсом 5 Гэв/с представлена на рис. 1.

В качестве элементов магнитной оптики были выбраны магнитные квадрупольные линзы типа МЛ-16, МЛ-17^{/4/} и магниты типа СП-12, СП-100^{/4/}.

На основе проведенных измерений^{/5/} топографии магнитного поля были определены эффективные длины линз и магнитов, а также измерены кривые намагничивания и другие параметры элементов канала. Эффективная длина линз МЛ-16 и МЛ-17 оказалась равной 1,105 м и 0,710 м соответственно, а магнитов СП-12: для первого по ходу пучка с углом поворота частиц $11^{\circ}33'50''$ - 3,144 м; для второго с углом поворота частиц $16^{\circ}28'14''$ - 3,127 м. Величина магнитного поля в магнитах была 10,626 кгс и 15,112 кгс.

Ориентация магнитов СП-12 была выбрана таким образом, чтобы для частиц с импульсом $p = 5,0$ Гэв/с углы влета частиц в магнит и вылета из него были бы равны половине угла поворота частиц в магнитном поле.

Определение положения мишени проводилось с помощью программы 1947-1^{/6/} при значении магнитного поля ускорителя 12,62 кгс, угле вылета вторичных частиц с импульсом 5,0 Гэв/с из мишени 0° и направлении начальной части канала (угол между осью прямолинейного промежутка синхрофазотрона и осью канала) $32^{\circ}23'18''$.

Координаты центра мишени оказались равными:

$$\phi = 1,356653,$$

$$R = 28,09 \text{ м},$$

где ϕ - азимутальное положение мишени.

При этом мнимый источник мишени в горизонтальной плоскости находился на расстоянии 18,91 м от эффективного среза первой линзы первого объектива, а в вертикальной плоскости - на расстоянии 5,57 м.

Длина мишени выбрана равной 100 мм, высота - 6 мм и поперечный размер - 3 мм.

С помощью программы подбора градиентов магнитного поля в квадрупольных линзах/7/ определялись параметры фокусирующей части магнитооптической системы для ряда случаев, когда первый триплет - линзы L_1 , L_2 , L_3 (см. рис. 1) - давал в горизонтальной плоскости примерно параллельный пучок и фокусировал его в коллиматоре по вертикали. Второй объектив, составленный, как и первый, из двух крайних линз типа МЛ-17 и линзы МЛ-16, фокусировал пучок на входе магнита СП-100. Третий объектив - дублет из двух линз МЛ-17, - включенный в горизонтальной плоскости по схеме ФД, передавал пучок на жидководородную пузырьковую камеру. Расстояния между эффективными срезами линз в первом объективе (в направлении движения частиц) были 1,107 м; 1,0 м; во втором - 1,093 м; 1,076 м; в третьем - 3,42 м. Расстояние между первым и вторым объективами составляло 31,96 м; вторым и третьим - 34,7 м и от третьего объектива до центра жидководородной пузырьковой камеры - 18,39 м. Расстояние от заднего среза последней линзы МЛ-17 первого объектива до коллиматора K_2 составляло 15,40 м и от коллиматора K_2 до переднего среза первой линзы второго объектива - 16,57 м.

При определении градиентов магнитного поля линз первого и второго объективов была учтена фокусировка пучка по вертикали первым и вторым магнитами СП-12. Магнит рассматривался как "толстая" линза, фокусное расстояние которой равно a_{11} / a_{21} , где a_{11} и a_{21} - элементы матрицы магнита СП-12 для описания вертикального движения. Положение главных плоскостей относительно центра магнита определялось как разность фокусных расстояний для "тонкой" ($1 / a_{21}$) и "толстой" линз.

При использовании представления протяженной мишени^{/9/} в виде фазового эллипса с помощью программы "Транспорт"^{/8/} определялись фазовые эллипсы, положение их центров, а также прямые коллиматоров в любой заданной точке канала. Окончательно режим работы первого и второго объективов был подобран при условии получения линейной компенсации импульсной дисперсии частиц в месте разделения их по массам - минимальное расстояние между центрами фазовых эллипсов для интервала импульсов $4,96 + 5,06$ Гэв/с. Последнее соответствует несколько расходящемуся пучку на выходе первого объектива в горизонтальной плоскости.

На основе проведенных расчётов с учётом дисперсии и сходимости частиц в интервале импульсов $4,96 + 5,06$ Гэв/с был определен профиль вертикального коллиматора K_2 . Его длина была выбрана равной $2,00$ м.

Выделение требуемого интервала импульсов ($\approx 1\%$) проводилось с помощью коллиматора K_3 . Его длина была взята равной $0,6$ м и размер щели - 60 мм. Поскольку по всей трассе пучок идет внутри ионопровода, при выборе зазоров коллиматоров было также учтено условие, чтобы в любом месте канала пучок не задевал как ионопровод, так и резонаторы отклоняющего устройства. Высоковакуумные объемы камеры синхрофазотрона и отклоняющего устройства были отделены от остальной части ионопровода тонкими (20 мк) лавсановыми диафрагмами.

На рис. 2 представлен расчётный импульсный спектр частиц в канале перед магнитом СП-100 (на расстоянии 80 м от мишени). Как видно из рисунка, импульс сепарируемых частиц равен $5,00 \pm 0,02$ Гэв.

На рис. 3а и 4а представлены ожидаемые распределения плотности пучка по горизонтали и вертикали соответственно в месте пространственного разделения частиц по массам (на входе магнита СП-100). Размеры изображений на полувысоте равны 21 и 16 мм.

При монтаже элементов системы транспортировки пучка основное внимание было обращено на точность выставления оборудования по трассе канала. Эта точность в горизонтальной и вертикальной плоскостях составляла $\approx 0,1$ мм. Для юстировки линз использовалась методика, аналогичная описанной в^{/10/}.

Наладка канала проводилась по частям. На первом этапе настраивались первый и второй объективы. В линзах этих объективов, а также в магнитах СП-12 были установлены токи, рассчитанные для частиц с импульсом 5 Гэв/с. Коллиматор K_2 был полностью открыт. Поскольку импульс выводимых из ускорителя вторичных частиц и положение их мнимых источников зависят как от абсолютного значения магнитного поля, так и его распределения, был экспериментально уточнен момент сброса ускоренных протонов на мишень, в который для расчётных токов в отклоняющих магнитах пучок шел по оси канала.

Предварительно проведенные с помощью программы для подбора градиентов/7/ расчёты показали, что имеется зависимость для изменения токов в элементах любого объектива, следуя которой можно изменять фокусирующие свойства объектива только в одной плоскости. В соответствии с этим токи в линзах первого объектива постепенно изменялись таким образом, чтобы "посадить" вертикальное промежуточное изображение в щель коллиматора K_2 . Вертикальный размер пучка в этом месте канала был определен путем изменения расстояния между "губками" коллиматора. Затем, оставляя без изменений вертикальную плоскость, проводили настройку этого объектива на минимальную ширину изображения по горизонтали перед магнитом СП-100. Аналогичным образом были подобраны токи второго и третьего объективов.

Выбранный метод наладки оптики канала является приближенным, так как при настройке фокусировки в одной плоскости фокусирующие свойства объектива в другой плоскости из-за неидеальности линз не остаются строго постоянными. Поэтому полученный в результате первичной настройки режим нуждается в последующей, относительно незначительной корректировке.

Контроль за качеством настройки осуществлялся с помощью "бегающих" счётчиков (дистанционно управляемые сцинтилляционные счётчики с пластиками $3 \times 10 \times 150 \text{ мм}^3$ и $5 \times 10 \times 100 \text{ мм}^3$), перемещение которых осуществлялось в горизонтальном и вертикальном направлениях перпендикулярно пучку. Все измерения мониторировались двумя телескопами сцинтилляционных счётчиков, один из них был направлен на мишень

(монитор мишени), второй окружал "бегающие" счётчики (монитор канала). Критерием правильной настройки являлась максимальная интенсивность при минимальных поперечных размерах пучка.

На рис. 3б и 4б представлены окончательные результаты настройки главной части канала - участка длиной 80 м. Размеры изображений по горизонтали и вертикали на полувысоте перед магнитом СП-100 равны 15 мм. Как видно из приведенных распределений пучка на входе магнита СП-100, имеется хорошее согласие между расчётом и экспериментом для вертикальной плоскости и несколько худшее совпадение для горизонтальной плоскости. Последнее качественно объясняется тем, что при рассмотрении горизонтального движения частиц предполагалось, что размеры источника равны физическим размерам мишени в этой плоскости. Однако такое приближение будет давать несколько завышенные размеры пучка в горизонтальной плоскости, так как при взаимодействии ускоренных частиц с мишенью распределение интенсивности вторичных частиц, по-видимому, имеет спад по толщине мишени и на самом деле эффективный размер ее будет меньше. Интенсивность частиц в канале составила 10^4 π -мезонов на 10^{11} протонов, взаимодействующих с мишенью.

В таблице представлены расчётные и полученные в результате наладки канала параметры магнитооптической системы. Данные таблицы показывают, что расчётные и экспериментальные параметры мало отличаются друг от друга для второго и третьего объективов. Разницу в параметрах для первого объектива можно объяснить неточностью в расчётах мнимых источников мишени.

Авторы выражают глубокую благодарность В.Н. Зубареву, С.В. Рихвицкому, В.С. Балашовой, В.М. Вишняковой, А.Н. Манятовскому, А.Н. Хренову, М.Н. Шкобиной, принимавшим участие в наладке канала, а также персоналу отделов, обслуживающих синхрофазотрон.

Л и т е р а т у р а

1. V.D. Volodin et al. Proc. VI Intern. Conf. on High Energy Accelerators. Cambridge, A-160, 1967.
2. К.П. Мызников, И.Н. Яловой. ПТЭ, 4, 19 (1963).

3. С.В. Мухин, В.А. Попов, С.В. Рихвицкий, И.Н. Семенюшкин. Препринт ОИЯИ, Р9-3165, Дубна, 1967.
4. Электрофизическая аппаратура промышленного изготовления. М., Атомиздат, 1963.
5. Ю. Бетко, И. Гласник, М. Полак, И. Пузьяк. Препринт ОИЯИ, Р-1945, Дубна, 1965.
6. Е.М. Кулакова, Л.А. Смирнова. Депонированная публикация ОИЯИ, Б2-1836, Дубна, 1963.
7. С.В. Мухин, П.А. Полубоярова, И.Н. Семенюшкин. Препринт ОИЯИ, 13-3461, Дубна, 1967.
8. Р.Н. Федорова, А.И. Широкова. Препринт ОИЯИ, 11-3381, Дубна, 1967.
9. В.С. Балашова, С.В. Мухин, И.Н. Семенюшкин. Препринт ОИЯИ, 9-5380, Дубна, 1970; Депонированная публикация ОИЯИ, Б1-9-5381, Дубна, 1970.
10. В.С. Балашова, В.И. Котов, Е.Д. Пашков, А.М. Фролов, О.Н. Цисляк. Препринт ОИЯИ, 2055, Дубна, 1965.

Рукопись поступила в издательский отдел

16 ноября 1970 года.

ТАБЛИЦА

Параметры элементов магнитооптической системы

Параметры элементов системы	Элементы магнитооптической системы									
	I объектив			II объектив		III объектив		M1	M2	M3
	МЛ-17 ^{х)}	МЛ-16	МЛ-17	МЛ-17	МЛ-17	МЛ-17	СП-12	СП-12	СП-100	
	гс/см	гс/см	гс/см	гс/см	гс/см	гс/см	кгс	кгс	кгс	
Расчёт	609,2	596,7	342,3	391,8	410,3	428,0	10,63	15,11	6,64	
Эксперимент	551,3	557,9	359,1	405,1	398,5	411,9	10,63	15,11	6,64	

х) Градиенты в линзах МЛ-17 первого и второго объективов были соответственно равны.

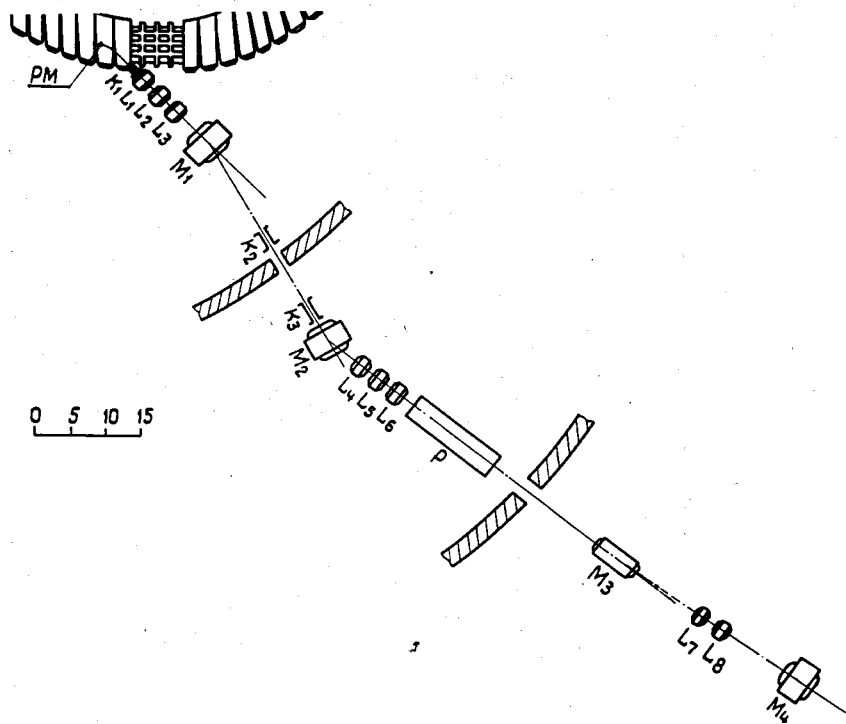


Рис. 1. Схема расположения элементов магнитооптической системы транспортировки пучка электродинамического сепаратора ЛВЭ: PM - мишень; K_1, K_2, K_2 - коллиматоры; L_1, L_2, \dots, L_8 - магнитные квадрупольные линзы; M_1, M_2, M_3, M_4 - магниты; p - отклоняющее устройство электродинамического сепаратора.

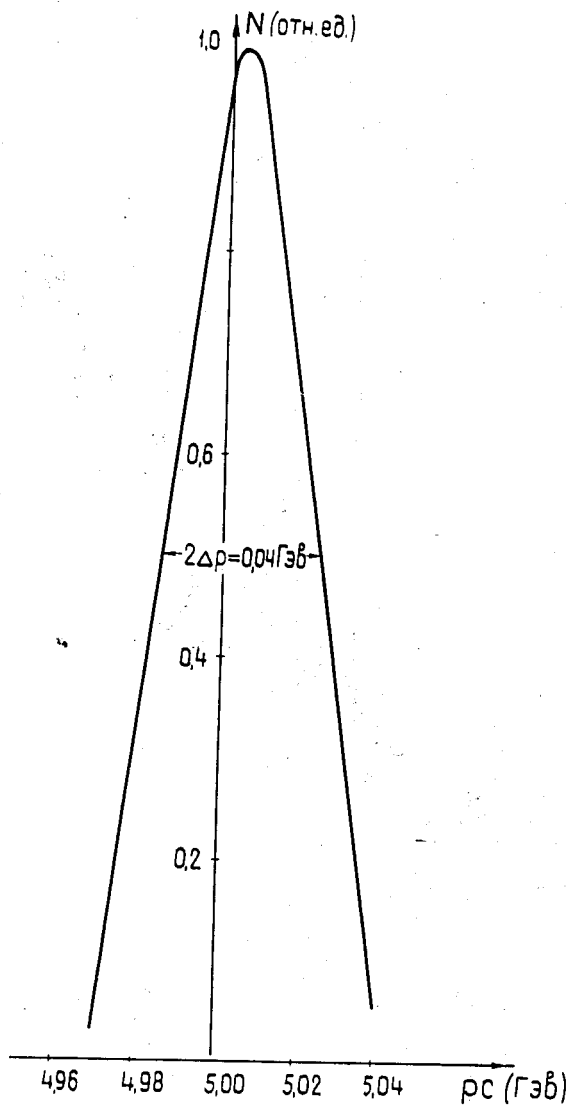


Рис. 2. Расчётный импульсный спектр частиц
(на входе магнита МЗ СП-100).

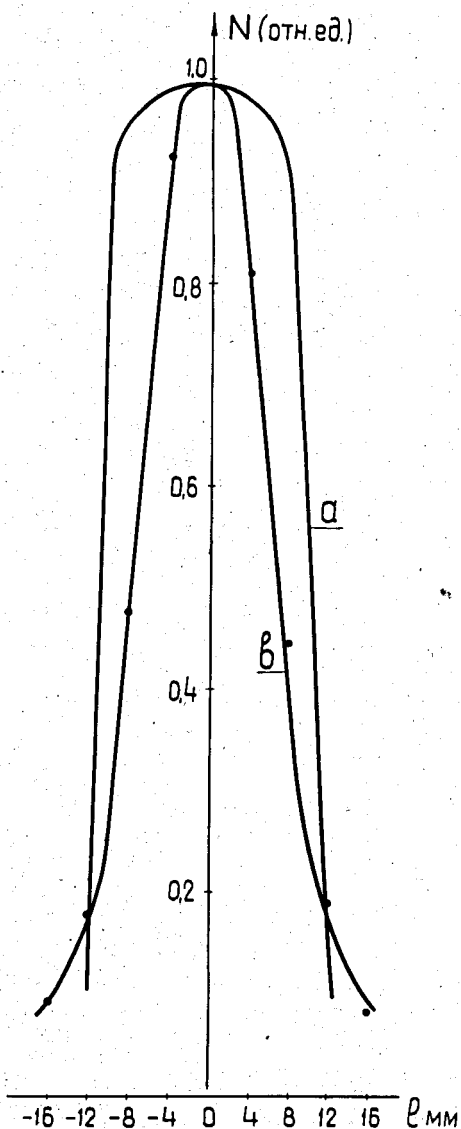


Рис. 3. Горизонтальный профиль сепарируемого пучка частиц в месте их разделения по массам (на входе МЗ СП-100): а - расчётный; б - измеренный с помощью сцинтилляционных счётчиков.

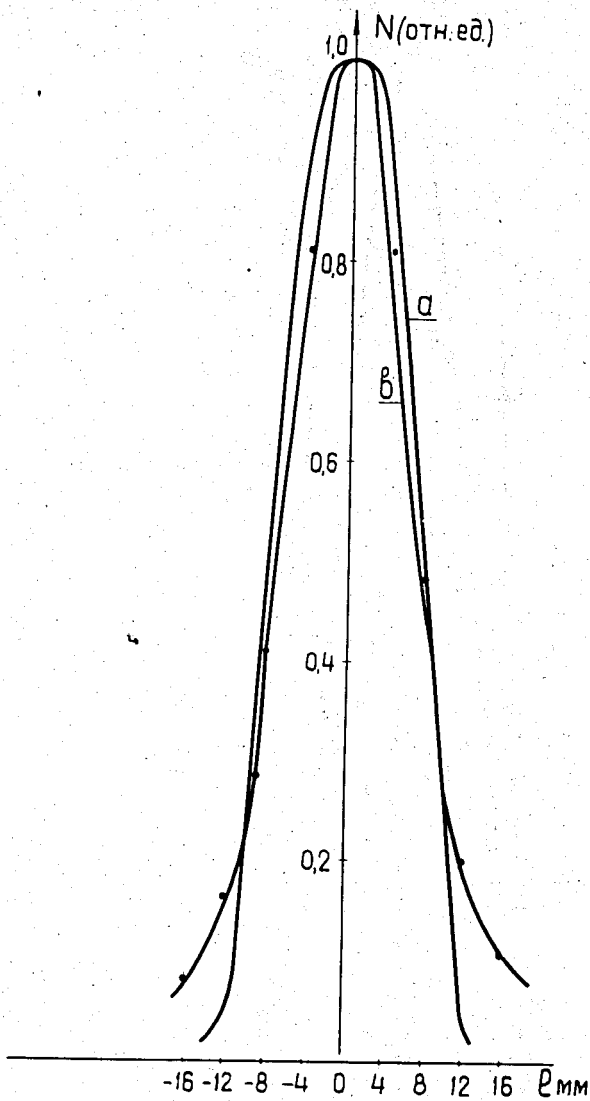


Рис. 4. Вертикальный профиль сепарируемого пучка частиц в месте их разделения по массам (на входе МЗ СП-100): а - расчётный, б - измеренный с помощью сцинтилляционных счётчиков.