

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



7505

Экз. чит. зала

9 - 7505

В.П. Дмитриевский, Н.Л. Заплатин, А.А. Кропин,  
В.С. Роганов, С.И. Чеснова

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОТОННОГО  
ТРАКТА ФАЗОТРОНА  
С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАЦИЕЙ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ (установка "Ф")

**1973**

**ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ**

9 - 7505

В.П. Дмитриевский, Н.Л. Заплатин, А.А. Кропин,  
В.С. Роганов, С.И. Чеснова

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОТОННОГО  
ТРАКТА ФАЗОТРОНА  
С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАЦИЕЙ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ (установка "Ф")

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Для большинства физических исследований с частицами высоких энергий необходимы не только интенсивные пучки частиц для постановки принципиально новых экспериментов, но и существенное улучшение соотношения эффекта и фона. Это приводит к требованию как эффективного вывода частиц из ускорителя, так и транспортировки пучка к экспериментальной аппаратуре с минимальными потерями. Задачи проводки и формирования пучка решаются путем использования элементов ионной оптики - обычно квадрупольных и дипольных магнитов.

Выбор системы транспортировки определяется совокупностью многих факторов. Оптимизацию параметров этих систем проводят с помощью ЭВМ. На первом этапе расчеты всегда выполняются в линейном приближении, и в большинстве случаев это оказывается вполне достаточным. Однако для расчетов ахроматических, дисперсионных и других сложных магнитных систем необходимо учитывать эффекты второго и третьего порядка малости. В настоящее время существует ряд работ, где собраны данные по расчету и проектированию ионооптических систем, /напр., /1,2/ /, а также описываются программы для решения проблем, связанных с этими системами /3,4/. В настоящей работе излагаются результаты расчетов по оптимизации параметров протонного тракта фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля /установка "Ф"/. Для расчетов использовались программы линейной оптики, разработанные в ОНУ ЛЯП ОИЯИ/ см. приложение/.

Взаимное расположение элементов ионной оптики на пучках фазотрона показано в работе <sup>6</sup>. Протонный тракт предназначен для формирования пучка на мишенях М3, М4, М5, М6 /рис. 1/ и транспортировки его к ловушке-гасителю. Тракт состоит из шести линз типа 15 К 50 /максимальный градиент -  $1300 \text{ э}\cdot\text{см}^{-1}$ , апертура - 15 см, длина полуса - 50 см/и отклоняющего секторного магнита СП-027 с однородным магнитным полем /угол отклонения -  $54^\circ$ , радиус кривизны - 250 см, длина центральной траектории - 235,5 см, апертура -  $15 \times 40 \text{ см}^2$  /. Линзы соединены в дублеты 1-2, 4-5, 6-7. Мишень М3 или М4 предназначена для получения пучков положительных и отрицательных пионов больших и малых энергий высокой интенсивности. Мишени М5 и М6 используются для облучения протонами ампул с различными веществами с последующей радиохимической или спектроскопической обработкой. В качестве мишени М6 могут применяться также газовые или жидкостные мишени, работающие в режиме быстрой химии или по программе ЯСНАПП <sup>7</sup>.

## 2. РАСЧЕТ ЭМИТТАНСА ПУЧКА НА ВХОДЕ В ПРОТОННЫЙ ТРАКТ

Для фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля разрабатывается регенеративный вывод протонов из камеры ускорителя. На рис. 2 изображены частицы на фазовой плоскости, которые забрасываются на вход магнитного канала;  $r$  и  $\partial r / \partial \phi$ ,  $z$  и  $\partial z / \partial \phi$  - радиальные и вертикальные координаты и скорости этих частиц в цилиндрической системе координат, связанной с ускорителем /рис. 3/. На этом рисунке показано расположение элементов системы вывода - возбуждателя, регенератора, магнитного канала, фокусирующего устройства. Разброс по энергиям в пучке выведенных протонов составляет  $\sim \pm 2 / \text{МэВ}$ . Расчет траекторий частиц через магнитный канал и краевое поле ускорителя определил оптимальные значения градиента поля в фокусирующем устройстве и указал на необходимость создания дополнительной радиальной фокусировки в первой железно-токовой секции канала.

На рис. 4 приведены огибающие и угловые огибающие в системе без градиентов и с градиентами  $G1 = 100 \text{ э}/\text{см}$  и  $G2 = 200 \text{ э}/\text{см}$ , соответственно в первой секции канала и фокусирующем устройстве /  $\phi$  - азимут, отсчитываемый от оси камеры по часовой стрелке,  $x, z$  - горизонтальные и вертикальные отклонения частицы от осевой траектории,  $x', z'$  - их производные по длине траектории  $s$  /. Из рисунка видно, что при введении таких градиентов радиальные размеры пучка на входе в первую квадрупольную линзу тракта уменьшаются в 2,3 раза, расходимость - в 2,8 раза. Это в значительной мере облегчает дальнейшую транспортировку пучка. Отметим также, что в вертикальном направлении размеры пучка уменьшаются в 1,5 раза, а расходимость возрастает в 1,6 раза. Оптимизация производилась по программе FIELD

При выбранных градиентах в канале и фокусирующем устройстве рассчитывался эмиттанс пучка на входе в первую квадрупольную линзу тракта. С этой целью на фазовой плоскости были проведены эллипсы минимальной площади так, чтобы все рассчитанные частицы лежали внутри /рис. 2/. Ориентация этих эллипсов показана на рис. 5, их площади составляют:  $\sim 70 \text{ пмм} \cdot \text{мрад}$  в радиальном направлении и  $\sim 20 \text{ пмм} \cdot \text{мрад}$  в вертикальном.

## 3. ПРОВОДКА БЕЗ ПОТЕРЬ ДО ЛОВУШКИ-ГАСИТЕЛЯ И ФОРМИРОВАНИЕ ПУЧКА В ТОЧКАХ М5 И М6

Задача транспортировки пучка через тракт к ловушке-гасителю без потерь обусловлена необходимостью исключить радиационное загрязнение элементов тракта во время настройки ускорителя. Оптимальная проводка пучка осуществляется такой расстановкой квадрупольных линз и выбором значения градиентов, чтобы огибающие пучка в обоих направлениях были минимальными, а также чтобы наличие разброса по импульсу незначительно увеличивало радиальную ширину пучка. Эта задача решалась на ЭВМ с помощью программы SYS1 путем сравнения многих вариантов транспортировки пучка данного эмиттанса.

Таблица 1

Градиенты в гс/см квадруполей, №№		1	2	4	5	6	7
Рис. 6	703	703	703	562,5	492,2	309,4	463,4
Рис. 7	759,08	714,6	699,80	727,55	742,6	708,63	

Если не ставить дополнительных условий к формированию пучка в определенных точках тракта /местах расположения мишеней/, то существует несколько равнозначных вариантов, отвечающих нашим требованиям. На рис. 6 показан один из таких вариантов, который может быть использован также и для формирования пучка при наличии мезонной мишени в точках М3 и М4. Для М3 в такой системе получается наибольшая угловая пропускная способность тракта за мишенью, а в М4 - вертикальный кроссовер пучка. Максимумы огибающих находятся в фокусирующих квадруполях и не превышают 6 см.

Как уже отмечалось выше, мишени, облученные в точках М5, М6, будут использоваться для радиохимических целей. Расположение только одной мишени в М5 или в М6 предполагается в относительно редких случаях, требующих повышенной плотности протонов для облучения имеющих малых количеств исследуемого вещества. Чаще будет использоваться вариант с одновременным расположением мишеней в точках М3, М4, М5, М6 с суммарной толщиной, допускаемой транспортировкой пучка без потерь интенсивности на элементах тракта. Поэтому параметры тракта выбирались так, чтобы обеспечить малые размеры пучка в точках расположения мишеней.

Весь тракт разбивался на части, в каждой из них оптимизировались градиенты линз. На рис. 7 показаны огибающие пучка, а также изображены фазовые эллипсы в точках М3, М5 и М6 при отсутствии в них мишеней. Для одновременного использования мишеней М3, М4, М5 их суммарная толщина может достигать нескольких сантиметров, при этом размеры пучка в точках несколько увеличиваются. Градиенты квадрупольных линз тракта, соответствующих рис. 6 и 7, показаны в табл. 1.

#### 4. ФОРМИРОВАНИЕ ПУЧКА В ТОЧКАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ МЕЗОННОЙ МИШЕНИ /М3 ИЛИ М4/

После прохождения частиц через мишень изменяются параметры пучка. Воздействие мишени приводит к сле-

дующему: а/ увеличивается расходимость пучка из-за многократного рассеяния частиц, б/ изменяются координаты частиц, в/ уменьшается энергия пучка, г/ поглощаются протоны в мишени и может быть значительной активация окружающих материалов, д/ изменяется разброс энергии в пучке.

Для каждой частицы с координатами  $x, x'$  на фазовой плоскости после прохождения мишени из-за многократного рассеяния появится дополнительный угол  $\delta$  и дополнительное смещение  $\Delta x$ , так что

$$|x_1'| = |x'| + |\delta|, \quad |x_1| = |x| + |\Delta x|,$$

$\delta$  - среднеквадратичный угол многократного рассеяния /в пределах этого угла находится 68% частиц/,  $\delta_{\max} = 1,94 \delta$  /в пределах этого угла находится 95% всей интенсивности/. Величины  $\delta$  и  $\Delta x$  получаются из известных формул теории многократного рассеяния

$$\delta = \frac{15}{\rho \cdot \beta \cdot c} \sqrt{\frac{\ell}{x_0}}; \quad \Delta x = \frac{\ell \delta}{\sqrt{3}},$$

где  $x_0$  - радиационная единица длины в  $г/см^2$  для данного вещества,  $\ell$  - толщина мишени в см,  $\rho$  - импульс частицы в МэВ. с<sup>-1</sup>.

В табл. 2 приводятся рассчитанные величины  $\delta$  и  $\Delta x$  для мишеней из графита, меди и свинца различной толщины.

Для формирования пучков вторичных частиц в точках расположения мезонной мишени /МЗ или М4/ желательно иметь малые размеры пучка. С другой стороны, для получения интенсивных пучков мезонов необходимо использовать максимально допустимую толщину мишени, которая определяется условиями проводки пучка протонов к ловушке-гасителю.

Рассмотрим возможности формирования пучка без потерь в МЗ и М4 при выполнении этих требований. Используя квадрупольный дублет 1-2, можно получить малые размеры его в точке МЗ, например, /2x25 / мм<sup>2</sup> для

Таблица 2

$E_m$ МэВ	$\Delta E$ МэВ	$\ell$ см	$\delta \cdot 10^{-2}$ рад	$\Delta x$ мм	$\eta$
Графит $\rho = 2,0$ г/см <sup>3</sup> , $x_0 = 42,4$ г/см <sup>2</sup> , $\lambda = 62$ г/см <sup>2</sup>					
670	10	2,3	0,45	0,06	0,93
660	20	4,5	0,65	0,17	0,86
650	30	6,8	0,78	0,31	0,80
640	40	9,0	0,92	0,48	0,74
Медь $\rho = 2,7$ г/см <sup>3</sup> , $x_0 = 24$ г/см <sup>2</sup> , $\lambda = 106,0$ г/см <sup>2</sup>					
$E_m$ МэВ	$\Delta E$ МэВ	$\ell$ см	$\delta \cdot 10^{-2}$ рад	$\Delta x$ мм	$\eta$
670	10	0,7	0,99	0,04	0,94
660	20	1,4	1,40	0,11	0,88
650	30	2,0	1,73	0,20	0,84
Свинец $\rho = 11,85$ г/см <sup>3</sup> , $x_0 = 6,52$ г/см <sup>2</sup> , $\lambda = 142$ г/см <sup>2</sup>					
670	10	0,7	1,53	0,07	0,94
660	20	1,5	2,18	0,19	0,89
650	30	2,2	2,7	0,35	0,84

Здесь:  $E_m$  - энергия протонов после прохождения ими мишени,  $\rho$  - плотность вещества,  $\eta$  - доля протонов, прошедших мишень без взаимодействия,  $\lambda$  - длина свободного пробега протона для упругого и неупругого взаимодействия,  $\Delta E$  - потеря энергии в мишени. Для одного и того же угла рассеяния толщины мишени относятся как радиационные единицы, например:

	C	Be	H <sub>2</sub> O	Al	Cu	Mb	Pb
1 г/см <sup>2</sup>		1,5	0,863	0,563	0,33	0,162	0,154
1 см		1,64	1,73	0,417	0,076	0,017	0,027

рассчитанного эмиттанта. Однако в этом случае возникают трудности по дальнейшей транспортировке пучка к ловушке-гасителю.

На *рис. 8* показан вариант фокусировки на мишень М3 при  $F_x D_x$ -ориентации дублета 1-2, а также границы аксептанта последующей части тракта /аксептант рассчитывался по программе ACSCAL /. В этом случае в точке М3 имеется вертикальный кроссовер пучка малого размера. Из рисунка видно, что даже без учета влияния мишени ~20% интенсивности теряется при дальнейшей транспортировке. Расчеты показали, что потери происходят в вертикально-фокусирующем квадруполе дублета 4-5. Использование мишени увеличивает потери интенсивности при транспортировке, причем часть пучка может теряться уже в магните. Результаты расчета при выполнении второго требования представлены на *рис. 9*, где показаны эмиттансы пучка и границы аксептанта системы в точке М3.

Размер пучка составляет 33 и 34 мм в вертикальном и радиальном направлениях, соответственно; углы  $\delta_x$  и  $\delta_z$ , а также толщины мишеней, при которых не происходит потери пучка в тракте, приведены в *табл. 3*. Огибающие пучка при использовании мишени из графита толщиной 5 см в М3 показаны на *рис. 10*.

Помещая мезонную мишень в точку М4, как видно из *рис. 6*, можно получить меньшие размеры пучка, чем в варианте мишени М3. В точке М4 имеется вертикальный кроссовер малой ширины /4 мм/. В горизонтальном направлении размер пучка составляет 45 мм /*рис. 11*/. В *табл. 4* показаны максимально допустимые углы рассеяния  $\delta_x$  и  $\delta_z$ , найденные из *рис. 11*, и соответствующие им толщины мишеней из различных материалов.

На основании выполненных расчетов /*табл. 3 и 4*/ можно сделать вывод, что постановка мишени в точку М4 более предпочтительна, чем в М3, так как в первом случае можно отводить протоны без потерь на ловушку-гаситель от более толстых мишеней при меньших размерах пучка.

Для того чтобы использовать более толстые мишени с целью получения интенсивных пучков мезонов, необхо-

Таблица 3

Мишень	$\delta_x \cdot 10^{-2}$ рад	$\delta_z \cdot 10^{-2}$ рад	Размер пучка		Толщина мишени в см		
			$\Delta x$ см	$\Delta z$ см	Графит	Бериллий	Вода
M3	0,8	1,0	3,4	3,3	5	8,15	8,6

Таблица 4

Мишень	$\delta_x \cdot 10^{-2}$ рад	$\delta_z \cdot 10^{-2}$ рад	Размеры пучка		Толщина мишени в см		
			$\Delta x$ см	$\Delta z$ см	Графит	Алюминий	Медь Свинец
M4	1,0	1,8	4,5	0,4	8	4	1 0,5

димо увеличивать апертуру радиально-фокусирующей линзы 5. Допустимое увеличение ее апертуры определяется пропускной способностью тракта и составляет  $\sim /25-30/см$ .

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для пучка протонов от фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля, полученных с помощью регенеративного вывода из камеры ускорителя, рассчитан эмиттанс пучка, который составляет  $\sim 70 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$  и  $\sim 20 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$  в горизонтальной и вертикальной плоскостях, соответственно.

2. Расчет оптимальных параметров тракта для выведенного пучка протонов показал, что рассматриваемый тракт обеспечивает транспортировку протонов к ловушке-гасителю без потерь с размерами пучка на ней  $/16 \times 22/мм^2$  при отсутствии мишеней для образования вторичных частиц.

3. При оптимизации параметров протонного тракта можно использовать мишени из графита толщиной до 8 см с размерами пучка протонов на них  $/45 \times 4/мм^2$  для получения интенсивных пучков вторичных частиц.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

*Краткое описание программ транспортировки, разработанных в ЛЯП ОНУ ОИЯИ*

В программах транспортировки используется линейная матричная теория <sup>1/</sup> проводки пучка через иконооптическую систему. Элементами системы являются длина дрейфа, секторные магниты с  $n \leq 0$  и  $n \geq 0$ , квадрупольные и тонкие линзы /края магнита/. Максимальное число элементов - 40. Вводятся в рассмотрение пятирядные матрицы в соответствии с записью:



$$\begin{pmatrix} z \\ z' \\ x \\ x' \\ \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_z & S_z & 0 & 0 & 0 \\ C'_z & S'_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_x & S_x & D_x \\ 0 & 0 & C'_x & S'_x & D'_x \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_0 \\ z'_0 \\ x_0 \\ x'_0 \\ \delta \end{pmatrix}$$

Здесь:  $z, z'$  - смещение и расходимость в вертикальной плоскости,  $x, x'$  - смещение и расходимость в горизонтальной плоскости,  $\delta = \Delta p/p_0$  - относительное отклонение импульса частицы от среднего,  $D_x, D'_x$  - дисперсия и ее производная.

Все длины в системе берутся в единицах радиуса магнита, что позволяет получать оптические параметры без привязки к энергии пучка.

Программа SYS1 позволяет рассчитывать линейные матрицы заданной ионооптической системы, траектории частиц, огибающие пучка, дисперсию и расстояния до фокусов в обеих плоскостях. В системе можно изменять 3 любых параметра с дискретным шагом. Программа работает с дисплеем на ЭВМ CDC -1604A.

Программа SYSIFIT используется для решения задач траекторного /"геометрического"/ согласования в системах транспортировки. Имеет все возможности программы SYS1. Согласование осуществляется при преобразовании пучка из фокуса в фокус или из параллельного пучка в фокус.

Программа ACSCAL предназначена для расчета аксептанса заданной ионооптической системы по геометрическим размерам апертуры. Аксептанс можно получить в любой точке тракта. Имеется возможность изменять оптические параметры и геометрические размеры апертуры элементов в процессе счета.

Программа FIELD используется для проводки пучка через краевое поле ускорителя. Траектория осевой частицы разбивается на достаточно большое количество шагов, на каждом шаге считаются показатель спада поля,

радиус кривизны осевой траектории, угол поворота частиц, вычисляются линейные матрицы для каждого шага. С помощью программы можно рассчитывать траектории частиц, аксептанс канала и фокусирующего устройства, а также изменять их параметры в процессе расчетов, для того чтобы получить многие варианты транспортировки.

Все программы написаны на языке ФОРТРАН-63 и работают на ЭВМ CDC -1604A, БЭСМ-6 и CDC-6200.

#### Литература

1. К.Штеффен. "Оптика пучков высокой энергии", изд. МИР, 1969.
2. В.И.Котов, В.В.Миллер. "Фокусировка и разделение по массам частиц высоких энергий". Атомиздат, 1969.
3. K.L.Brown, S.K.Howry. "TRANSPORT/360 a computer program for designing charged particle beam transport systems", SLAC Report No. 91, 1970.
4. В.В.Миллер. Препринт ОИЯИ, 9-3582, Дубна, 1967.
5. Х.У.Герш, С.И.Чеснова, А.А.Карлов, А.В.Кавченко. Сообщение ОИЯИ, 9-6253, Дубна, 1972.
6. А.А.Глазов и др. Препринт ОИЯИ, 9-3211, Дубна, 1967.
7. Р.Арльт, Г.Байер, В.С.Бутцев, К.Я.Громов, Б.И.Замолдчиков, Н.Г.Зайцева, В.Г.Калинников, В.В.Кузнецов, А.Потемпа, В.И.Райко, В.С.Роганов, А.Н.Синаев, Х.Тыррофф, М.Фингер, В.А.Халкин, В.М.Цупко-Ситников, В.Г.Чумин. ОИЯИ, БЗ-6-7256, Дубна, 1972.
8. B.rossi, K.Geisen. Rev.Nucl.Phys., 13, No. 4, 240 (1971).

Рукопись поступила в издательский отдел  
18 октября 1973 года.

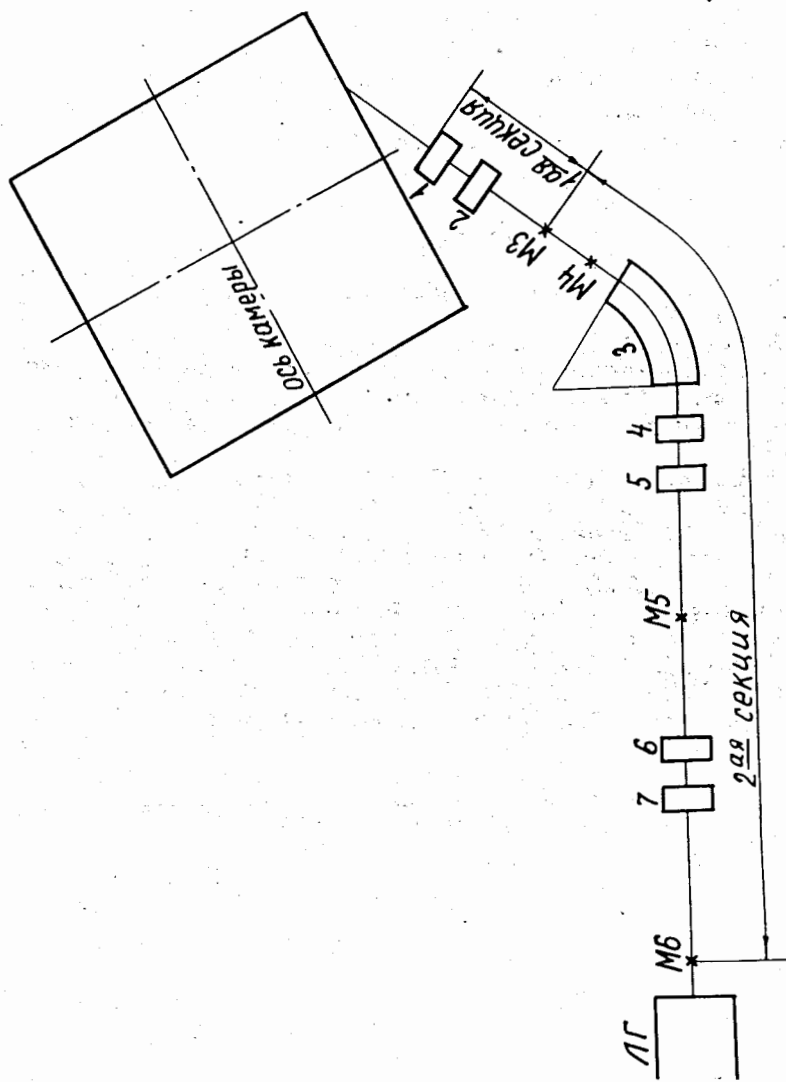


Рис. 1. Расположение элементов пролонного тракта уставки "Ф".

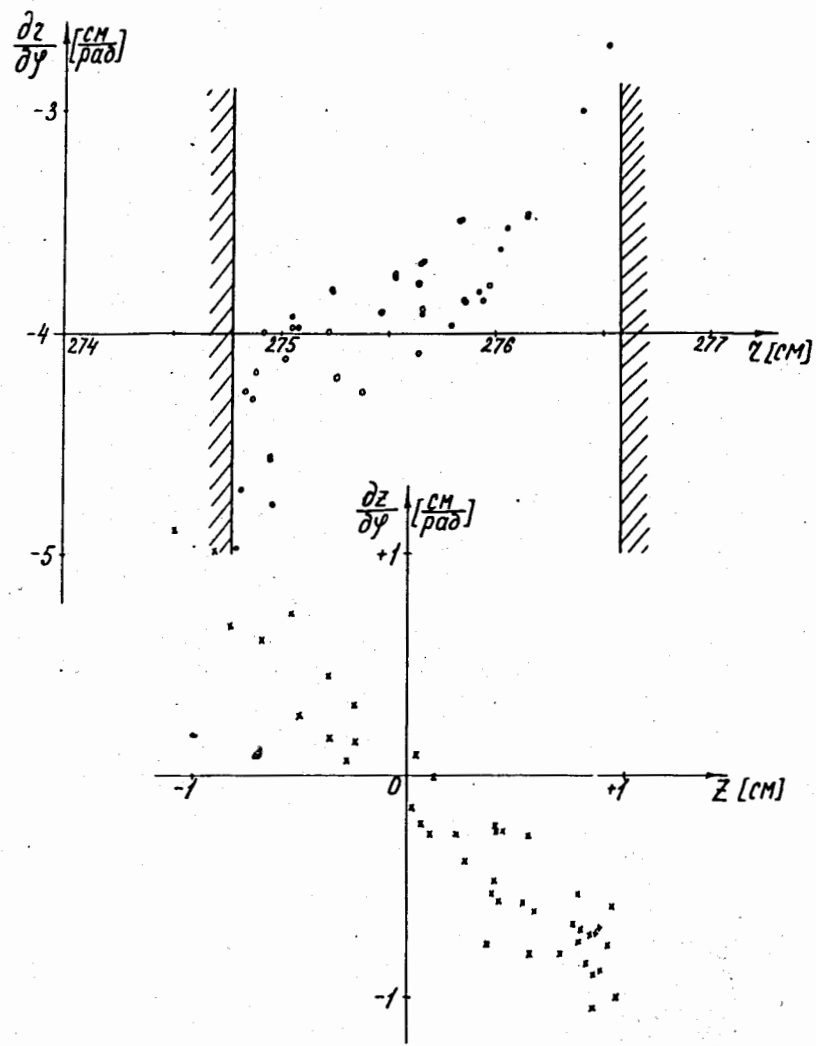


Рис. 2. Изображение на фазовой плоскости радиальных и вертикальных координат и скоростей частиц, забрасываемых в канал.

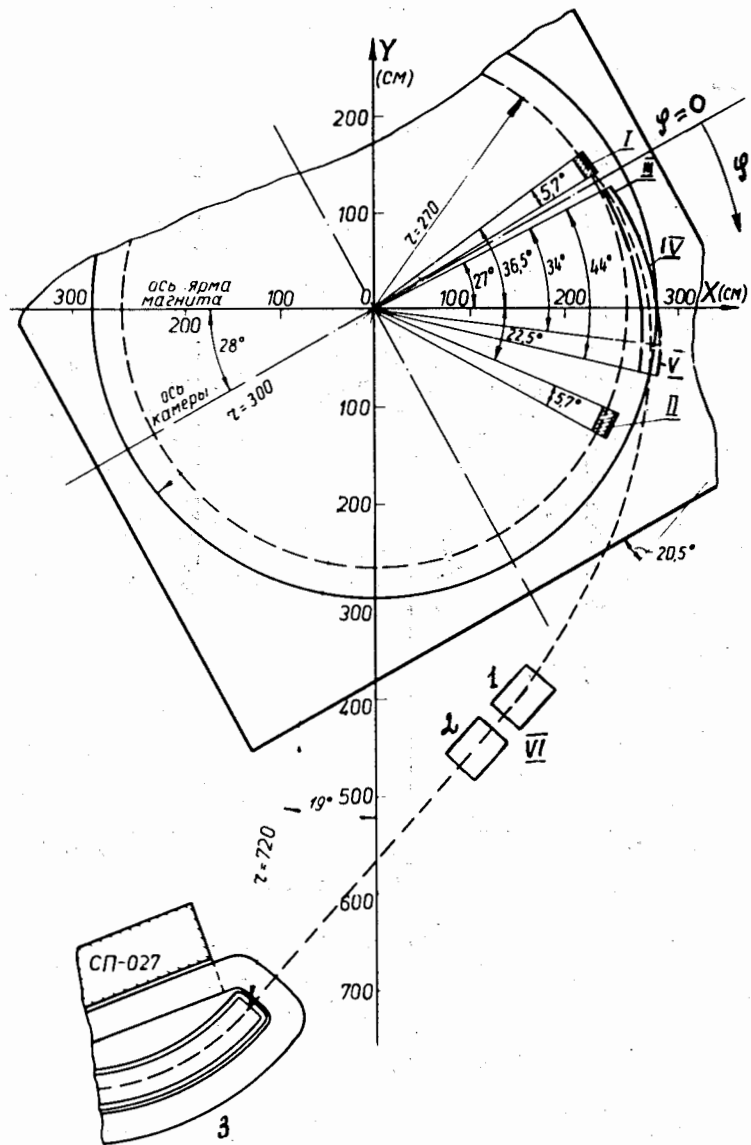


Рис. 3. Расположение элементов вывода пучка из ускорителя / I - возбуждатель, II - регенератор, III-IV - секции железного канала, V - фокусирующее устройство/.

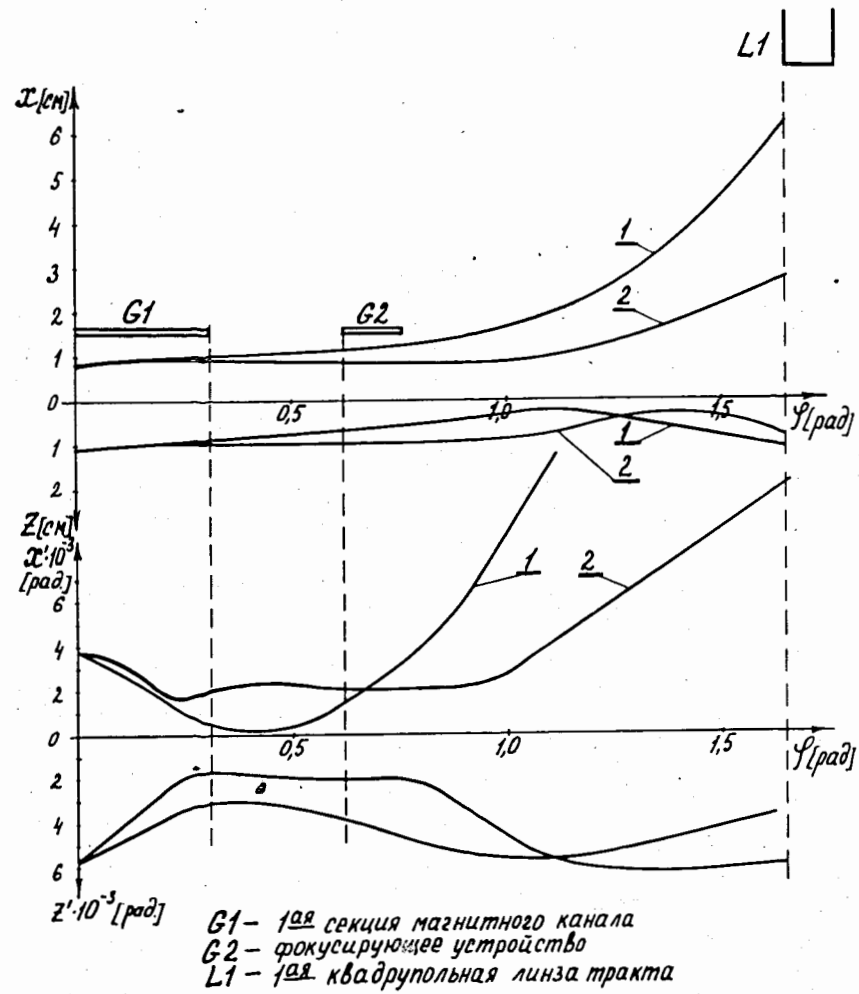


Рис. 4. Огибающие пучка и угловые огибающие вдоль осевой траектории /  $G1 = 0$ ,  $G2 = 0$ ; и  $G1 = 100$  э/см,  $G2 = 200$  э/см/.

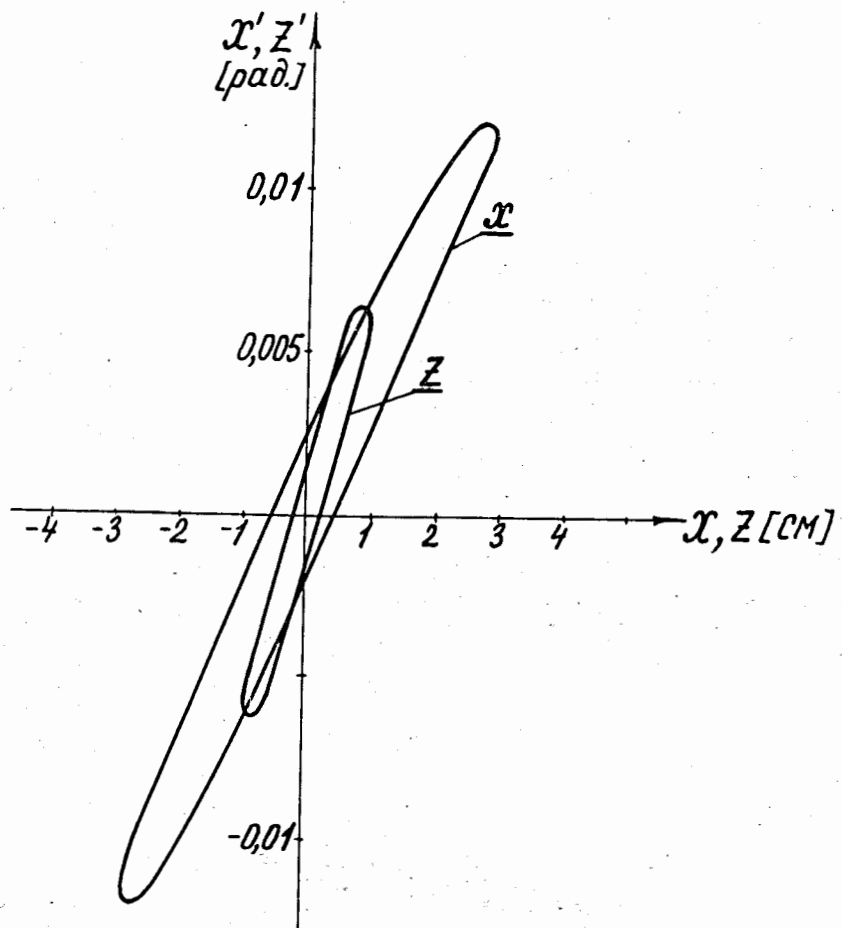


Рис. 5. Эмиттанс пучка на входе в первую квадрупольную линзу протонного тракта.

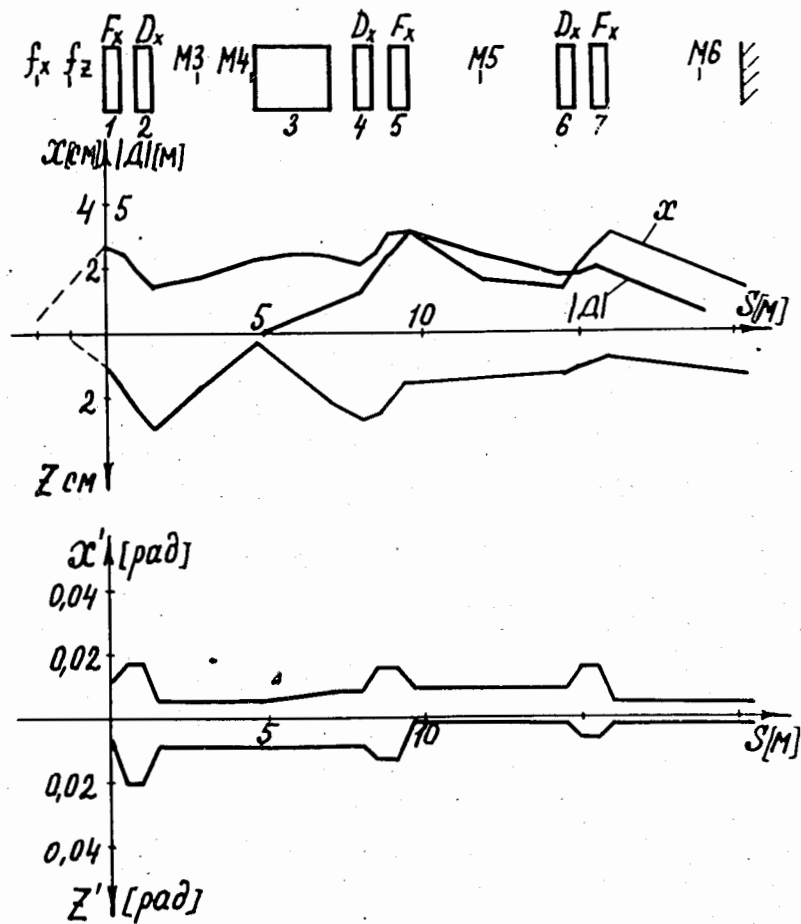


Рис. 6. Огибающие пучка и модуль функции дисперсии в случае отсутствия мишеней.

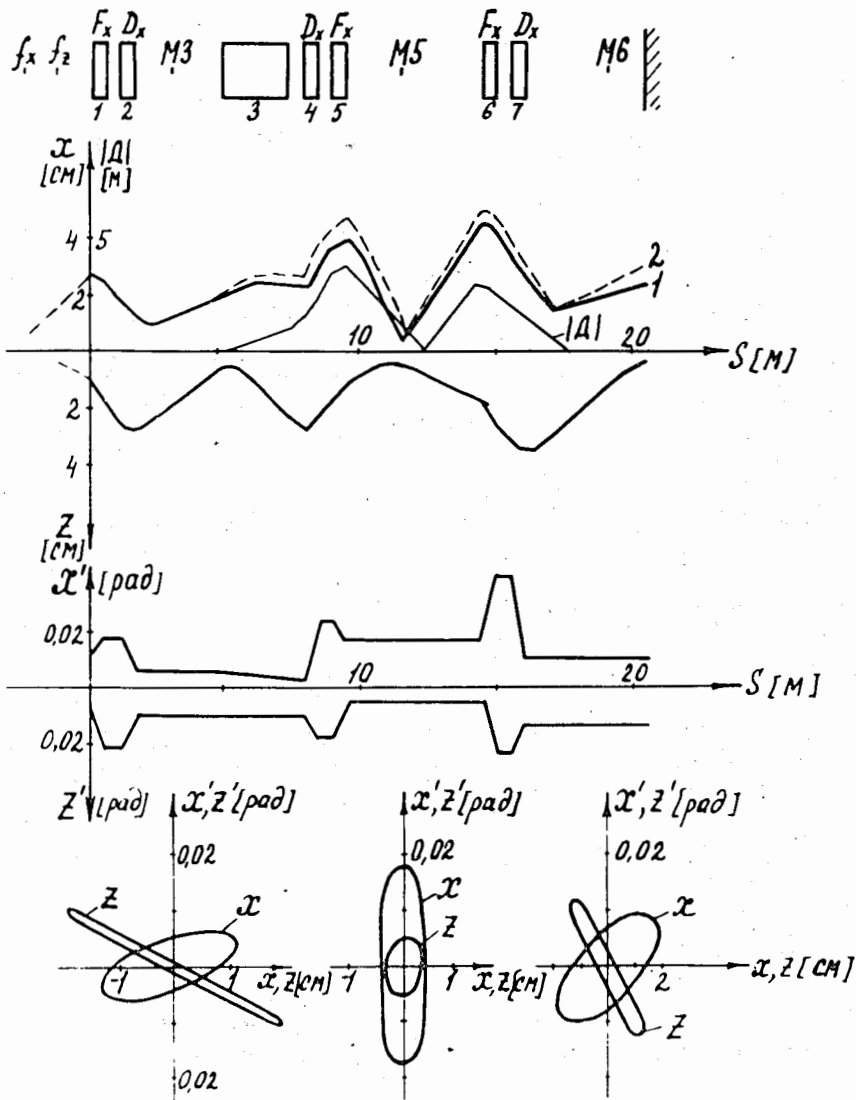


Рис. 7. Огибающие пучка протонов и фазовые эллипсы при малых размерах пучка в M5 и M6.

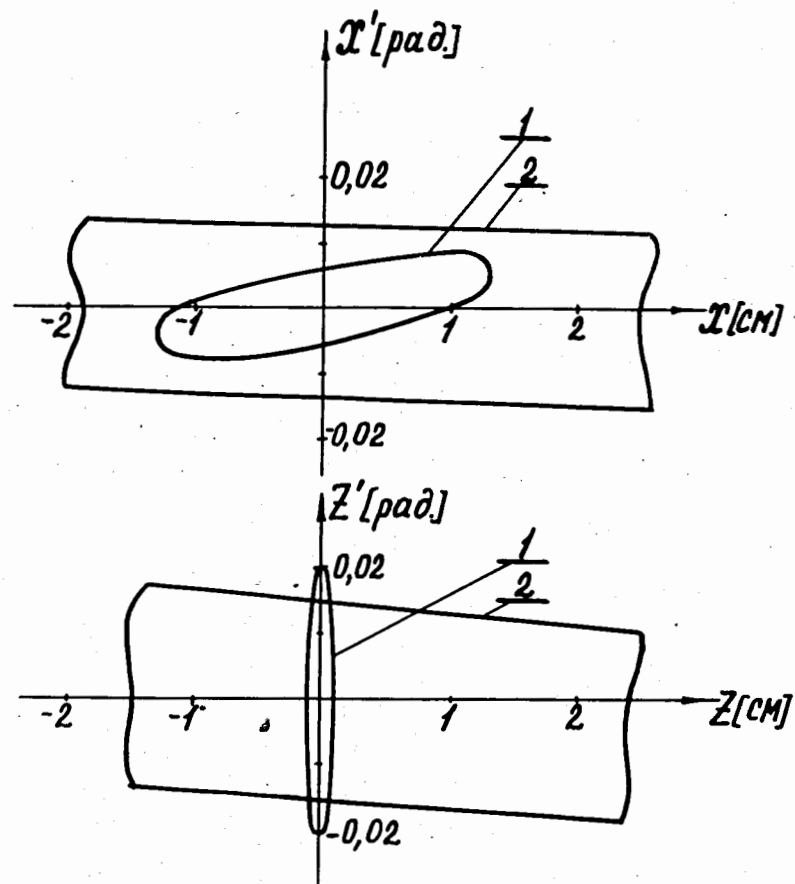


Рис. 8. Согласование эмиттанса пучка с аксептансом тракта при фокусировке в M3: 1/ - эмиттанс пучка, 2/ - границы аксептанса.

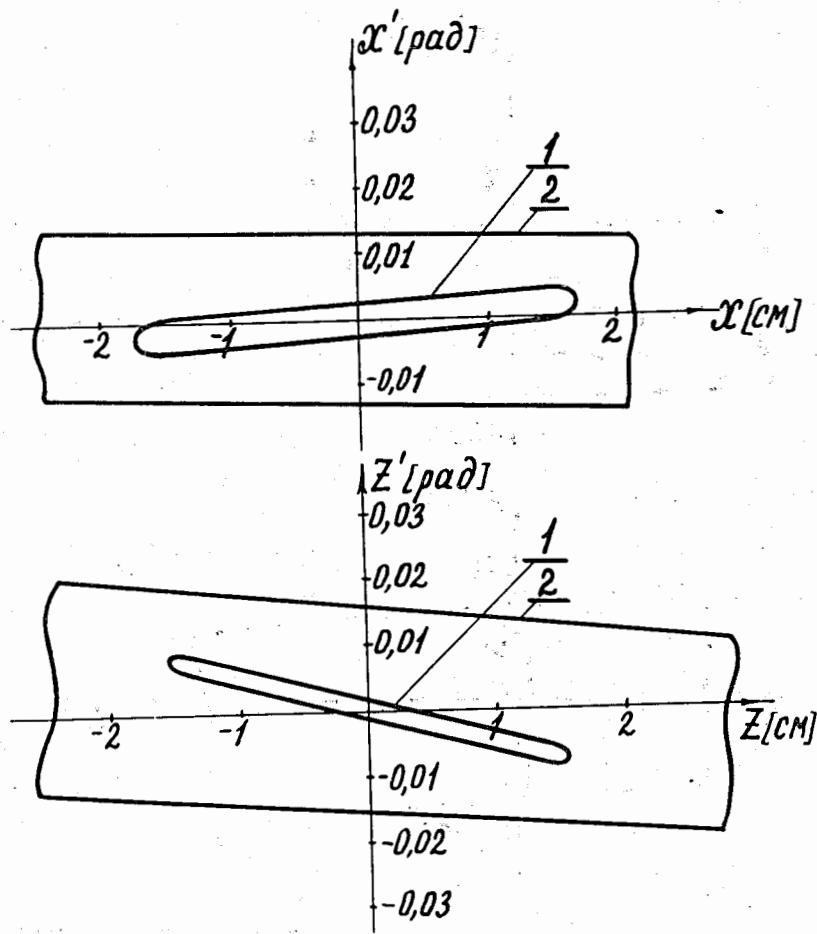


Рис. 9. Радиальный и вертикальный эмиттансы пучка и границы акцептанса в точке МЗ при максимальной толщине мишени, расположенной в этой точке: 1/ - эмиттанс пучка, 2/ - границы акцептанса.

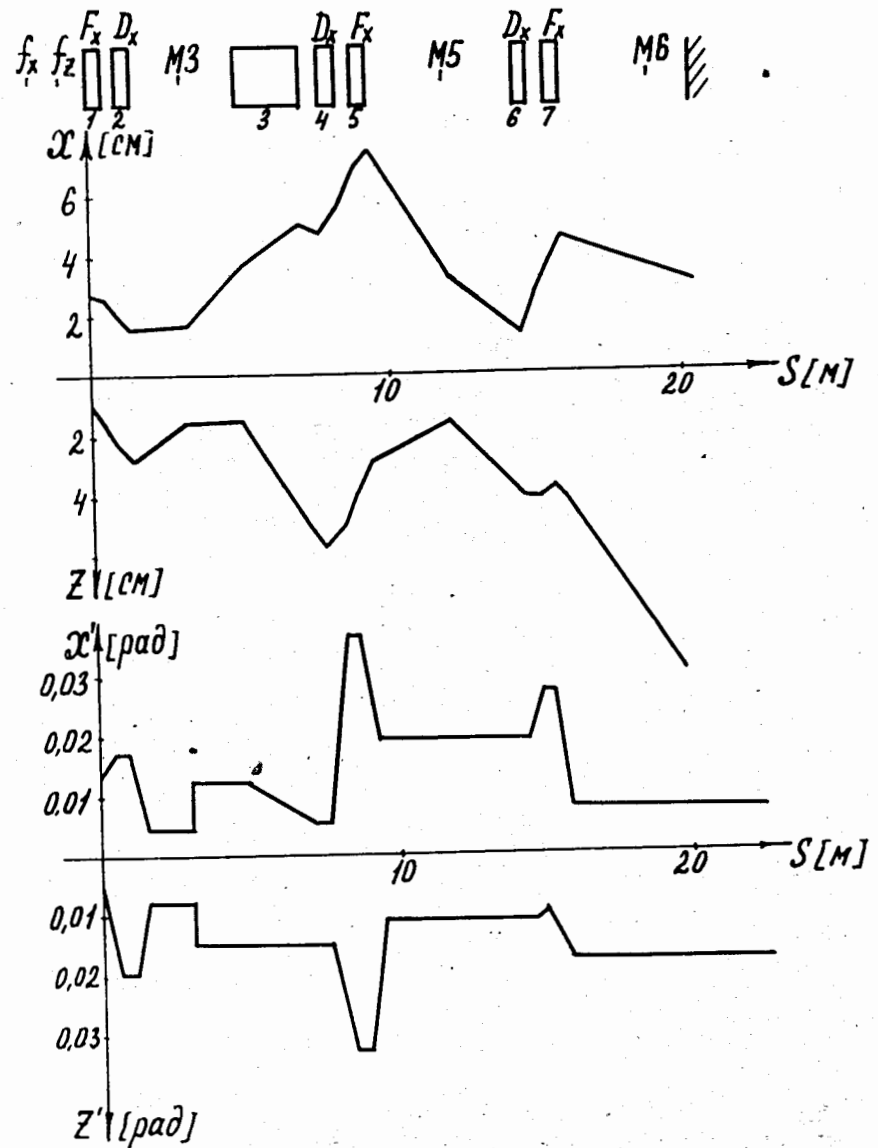


Рис. 10. Огибающие пучка при использовании в МЗ графитовой мишени толщиной 5 см.

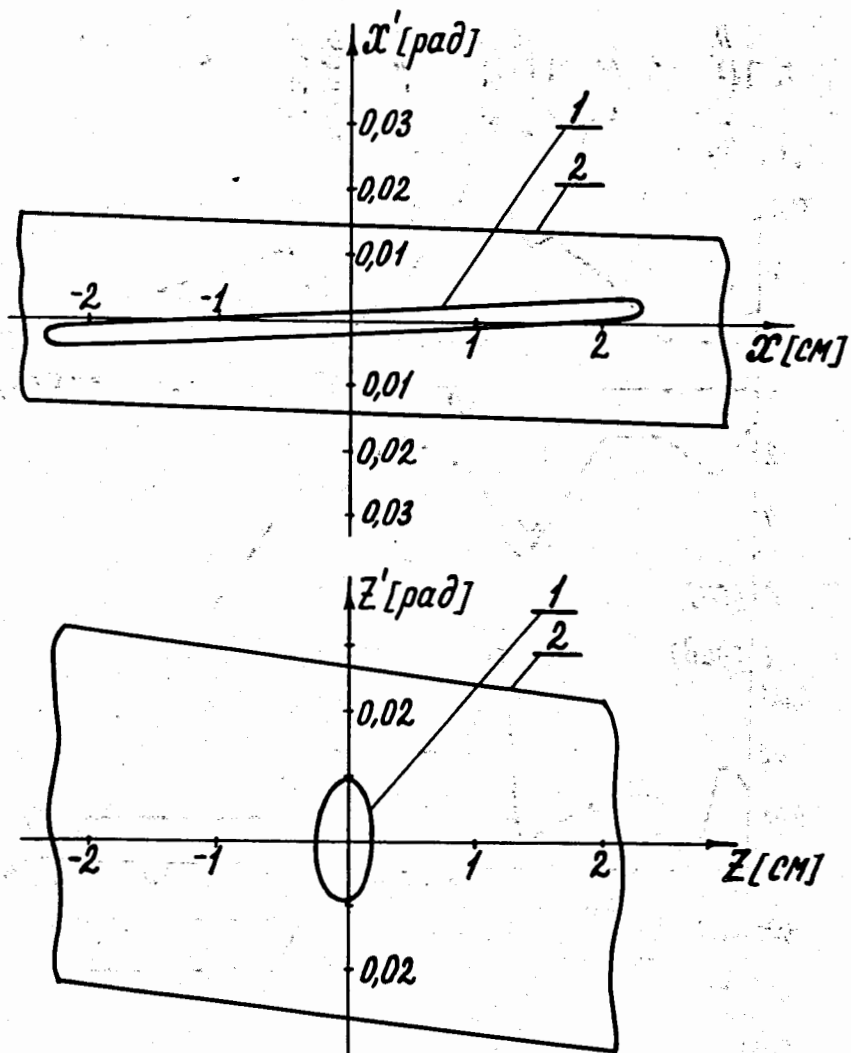


Рис. 11. Изображение эмиттанса пучка и аксептанса тракта за мишень в точке М4: 1/ - эмиттанс пучка, 2/ границы аксептанса для фокусировки в М4.

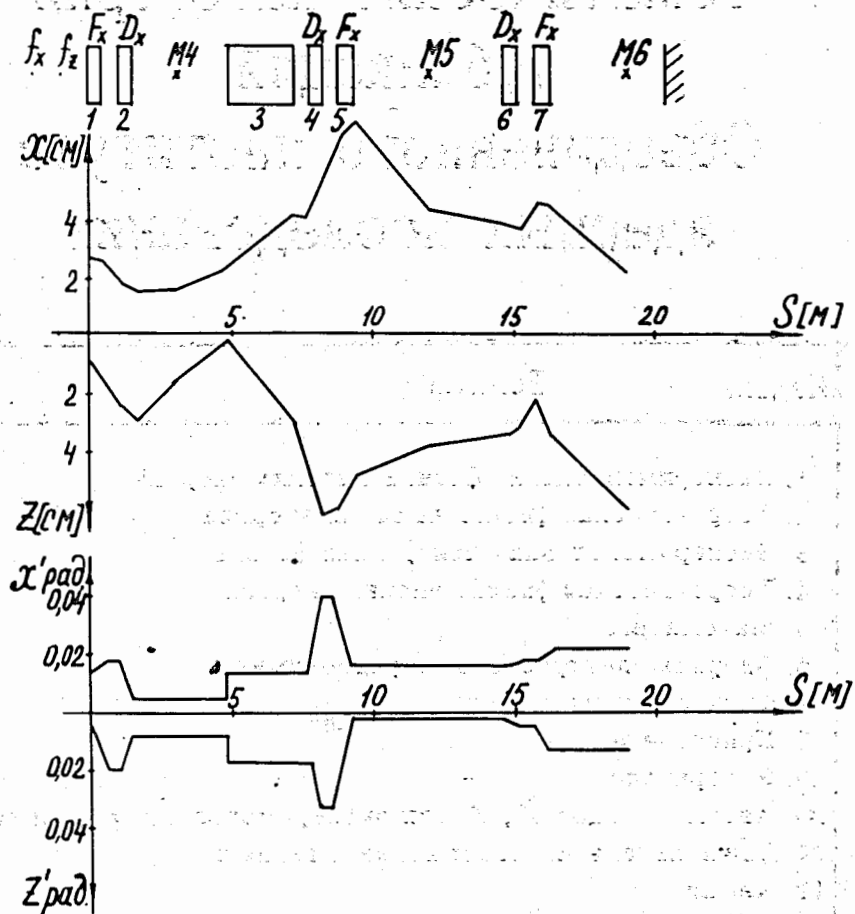


Рис. 12. Огибающие пучка с учетом влияния мезонной мишени, расположенной в М4.