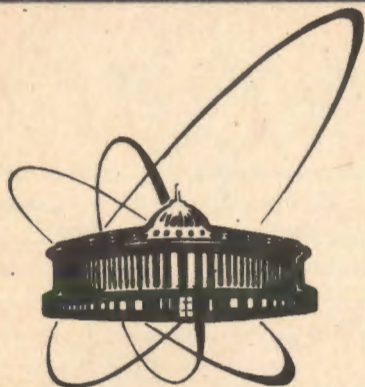


90-574



**сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна**

P9-90-574

**О.Н.Борисов, С.Б.Ворожцов, В.П.Дмитриевский,  
Н.А.Морозов, А.Ф.Чеснов, С.И.Чеснова**

**КОМБИНИРОВАННЫЙ ДЕФЛЕКТОР  
ДЛЯ ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА У-120К**

**1990**

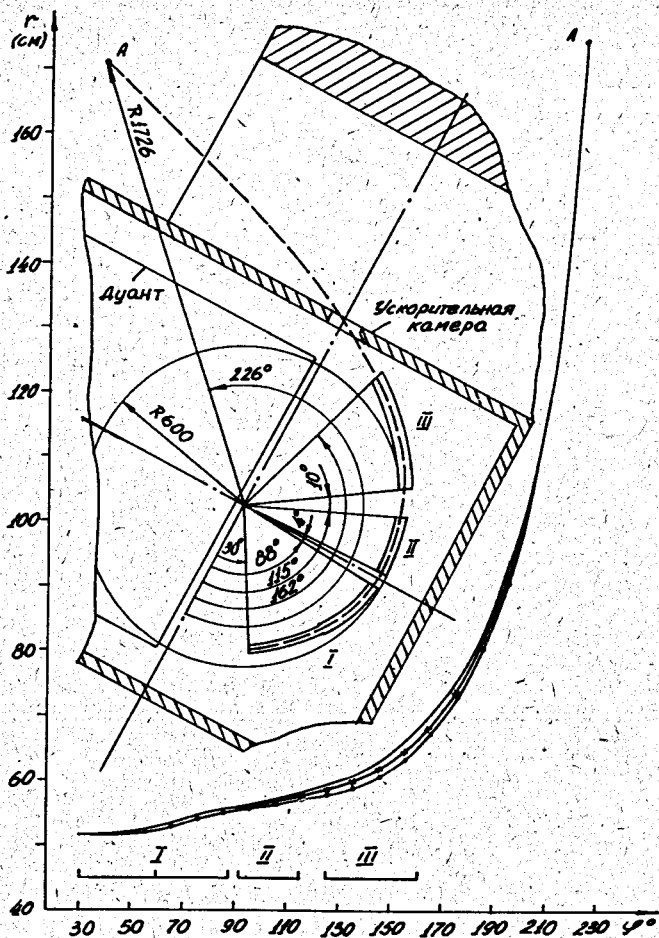


Рис.1. Схема расположения секций (I, II, III) комбинированного дефлектора в камере ускорителя и выводные траектории для трех энергий протонов:  $\cdots$   $W = 11,69$  МэВ,  $\cdots$   $W = 30,66$  МэВ,  $\text{—}$   $W = 39,78$  МэВ.

Эффективные радиальный и аксиальный эмиттансы растут с уменьшением энергии (в 1,2 раза для  $\epsilon_r$  и в 2,7 раза для  $\epsilon_z$ ), что обусловлено, в основном, ростом углового размера ( $\Delta r'$ ,  $\Delta z'$ ) пучка на входе в канал. Энергетический разброс в пучке ( $\Delta W$ ) не превышает  $\sim 0,4$  МэВ и определяется процессом многооборотного (3-5 оборотов) заброса частиц в канал при максимальном наборе энергии 0,1 МэВ за оборот.

Таблица 1. Параметры протонного пучка на входе в отклоняющий канал

Центральная траектория									
Эмиттансы									
W, МэВ	r, см	r', см/рад	$\Delta r$ , см	$\Delta r'$ , см/рад	$\Delta z$ , см	$\Delta z'$ , см/рад	$\Delta W$ , МэВ	$\epsilon_r$ , п-мм-мрад	$\epsilon_z$
11,69	51,801	-1,537	0,447	0,847	0,22	0,296	0,298	13,95	3,15
30,66	51,814	0,284	0,481	0,417	0,43	0,161	0,403	9,5	2,25
39,78	51,788	1,212	0,456	0,484	0,55	0,084	0,389	11,5	1,15

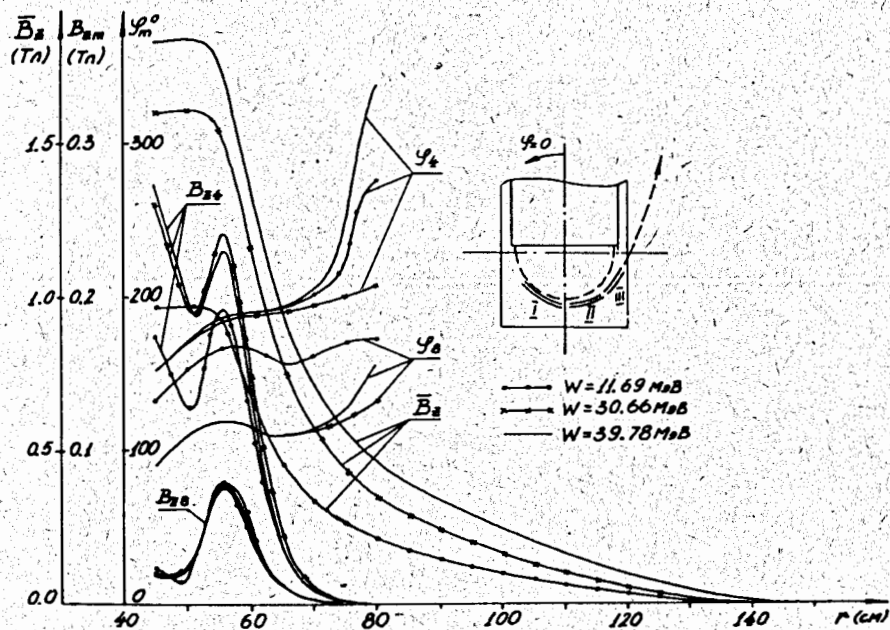


Рис.2. Зависимости среднего магнитного поля ( $\bar{B}_z$ ), амплитуд ( $B_4, B_8$ ) и фаз ( $\phi_4, \phi_8$ ) гармоник от радиуса для трех энергий протонов.

Выводные траектории для данных частиц показаны на рис.1. Величины электростатического и магнитного полей в секциях канала и их азимутальные протяженности (табл.2) подобраны так, чтобы осевые частицы попали на вход первого элемента системы транспортировки ( $\phi = 226^\circ$ ,  $r = 172,56$  см) при электрическом потенциале на пластинах дефлектора, не превышающем  $U = 75$  кВ.

Таблица 2. Параметры секций комбинированного дефлектора

№ секции	W, МэВ	Азимут. положение, град.	Радиальное положение, см		Радиус кривизны, см	Потенциал U, кВ	Магнитное поле, $\Delta B$ , Тл
			$r_{вх.}$	$r_{вых.}$			
I вх. (входн. часть)	11,69		51,801	52,81		34	
	30,66	30-60	51,814	53,35	66,81	69,9	
	39,78		51,788	53,56		75	
I вых. (выход. часть)	11,69		52,81	55,57		34	
	30,66	60-88	53,35	56,01	52,1	69,9	
	39,78		53,56	56,15		75	
II	11,69		55,87	57,43			0,113
	30,66	92-115	56,29	58,07	59,98		0,2461
	39,78		56,43	58,41			0,305
III	11,69		58,09	66,15			0,09
	30,66	125-162	59,04	67,44	105,22		0,104
	39,78		59,58	68,69			0,092

Из рис.1 и табл.2 видно, что выводные траектории пучка для частиц различных энергий не совпадают. Поэтому секции отклоняющего канала должны иметь независимые регулировки радиального положения, и их радиусы кривизны должны быть оптимизированы. На рис.3 приведены зависимости средних радиусов кривизны выводных траекторий для исследуемого диапазона изменения энергии протонов. Точками на данных кривых отмечены выбранные значения радиусов кривизны секций канала, при которых получены наименьшие отклонения выводных траекторий от геометрической оси, соответственно равные: 0,9; 0,3; 0,8 и 1,8 мм. Данные величины отклонения были учтены при выборе радиальных апертур секций отклоняющего канала.

Величины магнитного поля и его градиента вдоль выводных траекторий для трех энергий протонов показаны на рис.4. В области расположения II и III секций дефлектора диапазон изменения магнитного поля равен 1,0-1,8 Тл и 0,45-1,0 Тл, соответственно. Для таких уровней магнит-

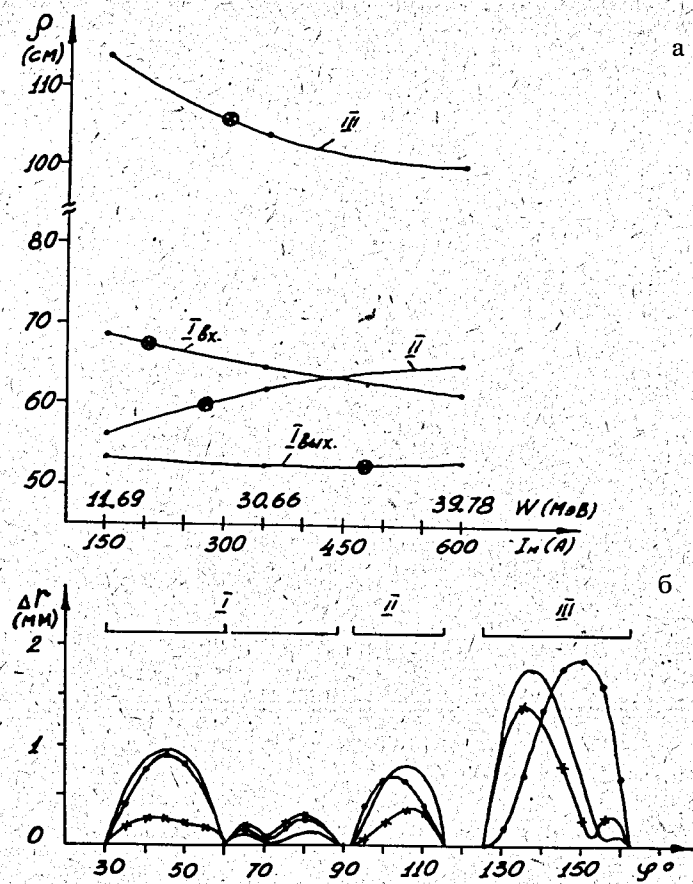


Рис.3. Зависимость средних радиусов кривизны секций отклоняющего канала при изменении энергии (а) и максимальные отклонения выводных траекторий от геометрической оси секций (б) при постоянных радиусах кривизны, обозначенных \* на кривых (а)  $\bullet-\bullet-\bullet$   $W = 11,69$  МэВ,  $\star-\star-\star$   $W = 30,66$  МэВ,  $—$   $W = 39,78$  МэВ.

ного поля использование ферромагнитных элементов возможно только для второй секции<sup>16,1</sup>. Величина намагниченности ферромагнитных пластин в области III секции будет изменяться при перестройке энергии ускоряемых частиц, что создаст определенные трудности для получения требуемых величин снижения магнитного поля и его градиента. Поэтому третья секция была выбрана токовой.

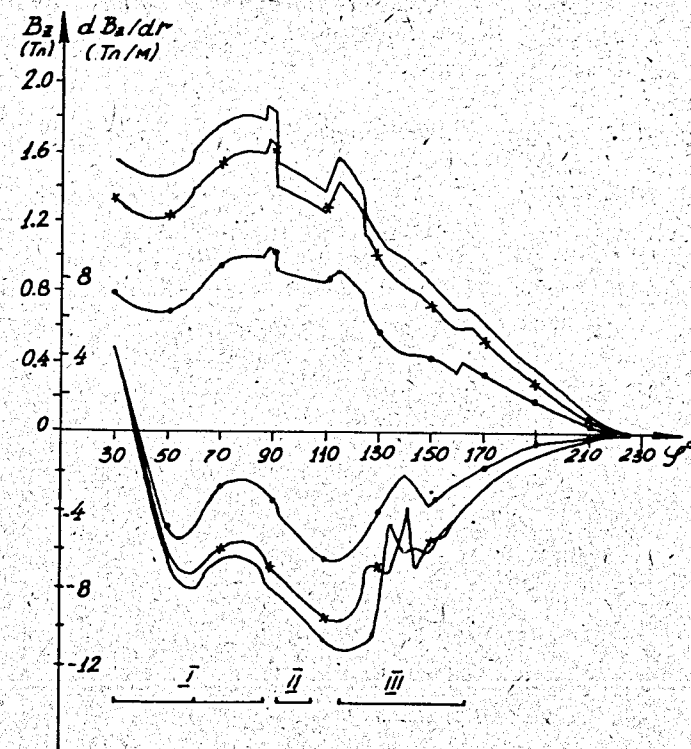


Рис.4. Распределение магнитного поля и его градиента вдоль выводных траекторий для трех энергий протонов:  $\bullet-\bullet-\bullet$   $W = 11,69$  МэВ,  $\star-\star-\star$   $W = 30,66$  МэВ,  $—$   $W = 39,78$  МэВ.

На входе в канал имеется радиально-фокусирующий градиент магнитного поля циклотрона азимутальной протяженностью  $\Delta\phi \sim 10^\circ$  с максимальной величиной 4 Тл/м. Это обстоятельство позволяет для входной части deflectора иметь постоянную радиальную апертуру и однородное электрическое поле, создаваемое плоским и (в поперечном сечении) электродами. На остальной части выводных траекторий имеется радиально-дефокусирующий градиент магнитного поля с максимальной величиной 11,5 Тл/м в области III секции канала.

Исследование фокусирующих свойств системы отклонения пучка и нахождение параметров, удовлетворяющих вышеприведенным требованиям, потребовало большого объема численных расчетов с учетом дисперсионных свойств системы отклонения и краевого магнитного поля циклотрона. В результате анализа были выбраны градиенты электро-

статического и магнитного поля, азимутальная длина входной части электростатического дефлектора и радиальная ( $2a_r$ ) и аксиальная ( $2a_z$ ) апертуры секций канала (табл.3).

Таблица 3. Геометрические апертуры и градиенты поля в секциях канала

W	I (входная часть)			I (выходная часть)			II		III	
	МэВ	$\Delta\phi$ град.	$2a_r/2a_z$ см	$d\mathcal{E}/dr$ кВ/см <sup>2</sup>	$2a_r/2a_z$ см	$d\mathcal{E}/dr$ кВ/см <sup>2</sup>	$2a_r/2a_z$ см	$d\Delta B/dr$ Тл/м	$2a_r/2a_z$ см	$d\Delta B/dr$ Тл/м
11,69	30	0,6/1,0	0	0,9/1,0	42,0	1,0/1,0	5	1,2/1,0	10,1	
30,66	30	0,6/1,0	0	0,9/1,0	86,3	1,0/1,0	7	1,2/1,0	11,5	
39,78	30	0,6/1,0	0	0,9/1,0	92,6	1,0/1,0	7	1,2/1,0	10,2	

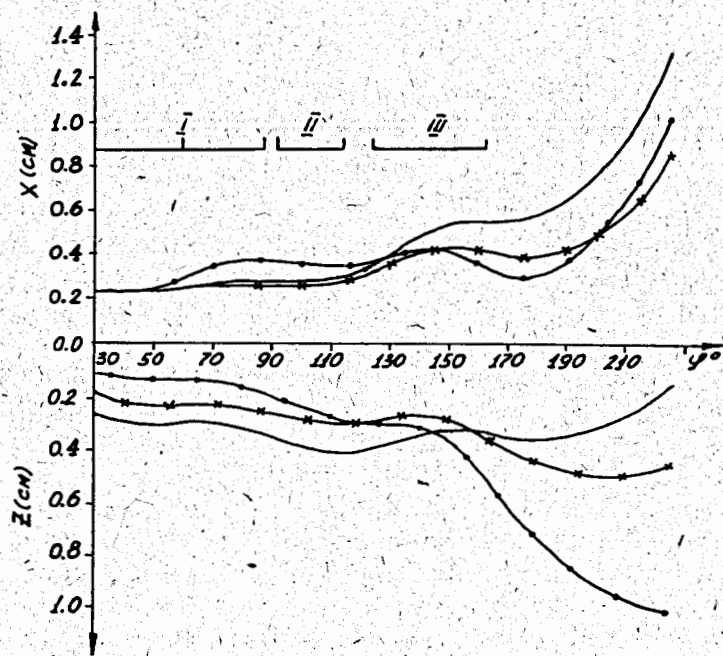


Рис.5. Горизонтальные и аксиальные огибающие пучка вдоль выводных траекторий:  $\bullet-\bullet$   $W = 11,69$  МэВ,  $\blacksquare-\blacksquare$   $W = 30,66$  МэВ,  $—$   $W = 39,78$  МэВ.

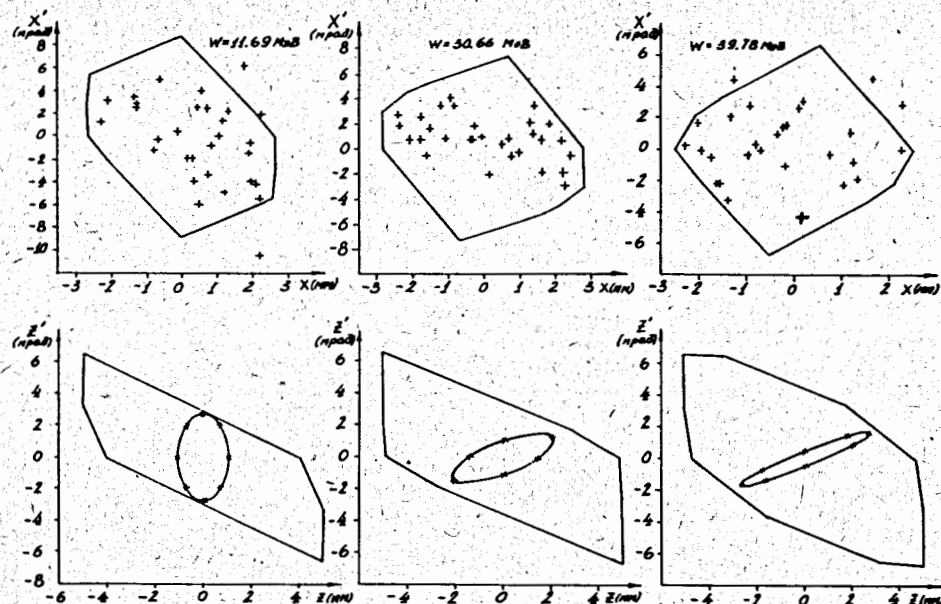


Рис.6. Горизонтальные и аксиальные акцептансы отклоняющего канала для трех энергий протонов.

На рис.5, 6 показаны огибающие пучка и акцептансы отклоняющего канала с учетом энергетического разброса (табл.1). При расчете акцептанса отклоняющего канала использовались физические апертуры секций, полученные в результате выбора постоянных радиусов кривизны. Из сравнения эффективных эмиттансов пучка и акцептансов комбинированного дефлектора для трех энергий протонов получены расчетные коэффициенты проводки пучка, соответственно равные: 90%, 100% и 90%. Эффективные эмиттансы на входе в систему транспортировки не превышают требуемых величин.

Для проверки выбранных параметров комбинированного дефлектора и коэффициента вывода пучка были проведены численные расчеты по точным уравнениям движения для исследуемого диапазона энергий протонов и трех энергий дейтронов ( $W = 11,6; 15,3; 18,5$  МэВ). Пучок представлялся 50-100 частицами с начальными амплитудами по  $r$  и  $z$  ( $A_r = 1; 2; 3; 4$  мм,  $A_z = 0,5; 1,0; 1,5$  мм), что соответствует эмиттансам внутреннего пучка перед зоной раскочки радиальных колебаний  $\epsilon_r = 40$  п.мм-мрад и  $\epsilon_z = 1,4$  п.мм-мрад. Результаты расчета подтвердили правильность выбранных параметров отклоняющего канала и ожидаемую величину эффективности вывода  $\geq 80\%$ .

## ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ДЕФЛЕКТОР

Конфигурация электродов для входной и выходной частей дефлектора и расчетное распределение радиальной компоненты электрического поля для двух значений аксиальной координаты показаны на рис.7. Расчет поля проводился методом граничных интегральных уравнений по программе ВМ<sup>171</sup>. Из кривых распределения напряженности электрического поля видно, что аксиальные апертуры для однородной и фокусирующей частей дефлектора соответственно равны 2 см и 1 см, что достаточно для прохождения пучка без потерь (рис.5). Для выбранной азимутальной протяженности дефлектора  $58^\circ$  отход пучка от последней орбиты на входе во II секции составляет  $\sim 2,7$  см. Данная величина разделения орбит определяет допустимую толщину септума II секции отклоняющего канала.

Расчетные потери пучка на септуме дефлектора не превышают 10%, что составляет  $\sim 0,5$  кВт выделяемой мощности для энергии протонов 40 МэВ. Поэтому в конструкции дефлектора предполагается ввести косвенное охлаждение электродов, а входную часть септума изготовить из предварительно натянутых молибденовых фольг. Такое исполнение увеличивает электрическую прочность и стабильность работы дефлектора. Выбор окончательной формы электродов и их охлаждения будет определен в процессе моделирования макета дефлектора в магнитном поле.

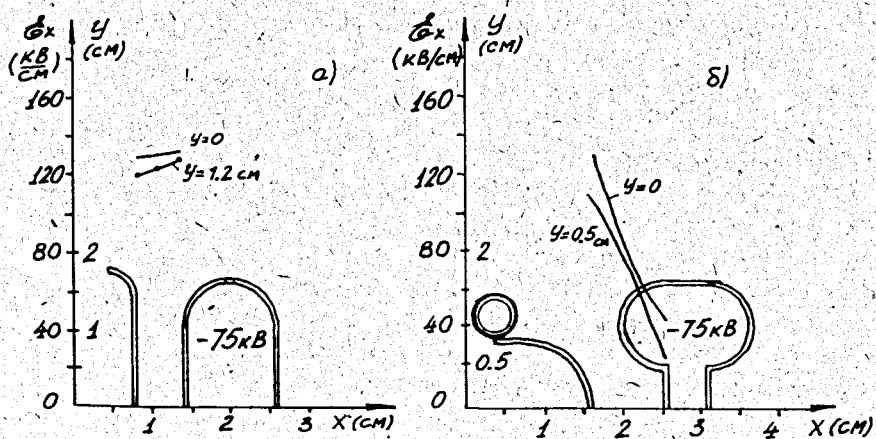


Рис.7. Форма электродов для входной (а) и выходной (б) частей электростатического дефлектора и распределение напряженности электростатического поля.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СЕКЦИЯ

Электромагнитная секция состоит из двух ферромагнитных пластин, одна из которых является подвижной в радиальном направлении, и двух водоохлаждаемых 4-витковых катушек. Токовые катушки, изготовленные из квадратного медного проводника  $6 \times 6$  мм<sup>2</sup>, соединены последовательно по току и параллельно по воде.

Конфигурация катушек и ферромагнитных пластин секции выбрана с помощью двумерных расчетов магнитных полей, создаваемых беско-

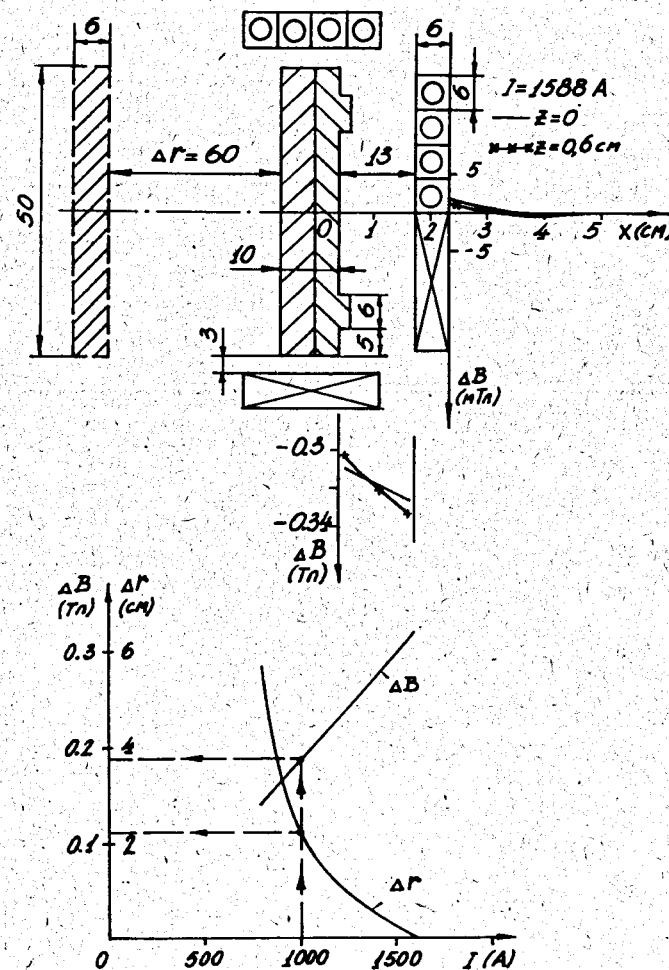


Рис.8. Поперечное сечение электромагнитной секции и распределение магнитного поля в зависимости от величины тока и радиального положения подвижной ферромагнитной пластины.

нечными токовыми пластинами и ферромагнитными пластинами конечной длины. В расчетах учитывалась реальная конфигурация проводников с водоохлаждаемыми каналами  $\phi$  3,6 мм и промежутками между ними, определяемыми толщиной изоляции. Учет данных эффектов необходим, так как они определяют величину неоднородности распределения магнитного поля вблизи септума вдоль вертикальной апертуры, обусловленную неравномерным распределением плотности тока по высоте. На рис.8 приведены результаты двумерных расчетов магнитного поля и выбранная геометрия катушек и ферромагнитных пластин. Изменение величины магнитного поля в апертуре секции в требуемом диапазоне осуществляется за счет перемещения подвижной ферромагнитной пластины в радиальном направлении от центра ускорителя ( $\Delta r \sim 6$  см) с соответствующим изменением тока в катушках ( $I = 700 \div 1600$  А). При максимальном рабочем токе в катушках  $I = 1600$  А ( $j = 62$  А/мм<sup>2</sup>) потребляемая секцией мощность будет составлять  $\sim 8,1$  кВт. В конструкции предусмотрены дистанционные регулировки радиального положения секции и подвижной ферромагнитной пластины в магнитном поле ускорителя без нарушения вакуума. Токовые катушки имеют радиационно стойкую изоляцию и размещены в корпусе из нержавеющей стали. Общая толщина септума, включая толщину стенок корпуса, будет составлять  $\sim 10$  мм.

## ТОКОВАЯ СЕКЦИЯ

Токовая секция канала должна обеспечить величины снижения магнитного поля и его градиента соответственно равные:  $\Delta B = 0,1$  Тл;  $d\Delta B/dr = 10$  Тл/м. Диапазон изменения данных величин при изменении энергии ускоряемых частиц не превышает 10% (табл.2, 3).

Конфигурация проводников секции была выбрана с помощью двумерных расчетов магнитных полей, создаваемых бесконечно длинными прямоугольными пластинами. Поперечное сечение секции и распределение магнитного поля и его градиента в зависимости от тока в катушках показаны на рис.9. Токовая секция состоит из шести катушек, выполненных из медного водоохлаждаемого проводника и расположенных симметрично относительно средней плоскости циклотрона. Все катушки соединены последовательно по току и питаются от одного источника. Две септумных катушки подобны токовым катушкам электромагнитной секции. Для формирования градиента магнитного поля используются две рейстрекковые катушки, каждая из которых имеет по три витка. Шиммирование возмущений магнитного поля осуществляется с помощью двух одновитковых катушек. Как видно из рисунка, обеспечивается плавное регулирование величины снижения магнитного поля и градиента

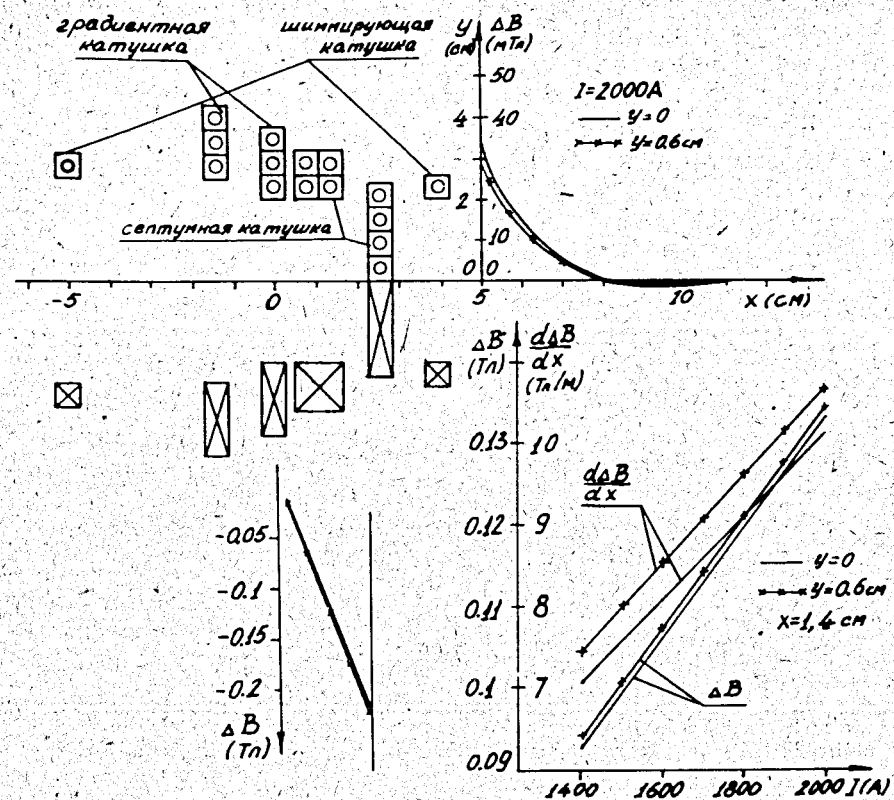


Рис.9. Поперечное сечение токовой секции и распределение магнитного поля и его градиента в зависимости от тока в катушках.

за счет изменения тока в катушках ( $I = 1400 \div 2000$  А). Отклоняющая сила и градиент магнитного поля на один ампер тока в катушках соответственно равны 0,067 мТл, 5,1 мТл/м. При длине секции 0,5 м и максимальном токе  $I = 2000$  А ( $j = 77,5$  А/мм<sup>2</sup>) потребляемая мощность составляет 46 кВт.

## ВЫВОДЫ

Расчетная эффективность вывода пучка из циклотрона У-120К, при использовании комбинированного дефлектора, составит  $\geq 80\%$  для всего диапазона энергий ускоряемых частиц.

Эффективность проводки пучка через отклоняющий канал составляет  $\geq 90\%$ .

Для настройки системы вывода необходимо иметь автоматизированную систему диагностики пучка и регулировки радиального положения секций отклоняющего канала.

В заключение авторы благодарят Э.Трейбала (ИЯФ, ЧСАН) за ценные советы и предложения и Г.Н.Сайфулину за помощь в оформлении данной работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриевский В.П. и др. — В сб.: Материалы III совещания по изохронному циклотрону У-120М и его использованию для решения физических проблем (Ческе Будейовице, ЧССР), ОИЯИ, Р9-7339, Дубна, 1973, с.22.
2. Баркова А., Паливец С. — В сб.: Труды II Международного совещания по циклотронам и их применению (Бехине, ЧССР). ОИЯИ, Д9-89-708, Дубна, 1989, с.264.
3. Дмитриевский В.П. и др. — В сб.: Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Д9-87-105, Дубна, 1987, т. II, с.237.
4. Дмитриевский В.П. и др. — Сообщение ОИЯИ 9-87-723, Дубна, 1987.
5. Борисов О.Н. и др. — В сб.: Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (тезисы докладов). М.: ИТЭФ, 1990, с.157.
6. Аленицкий Ю.Г., Заплатин Н.Л., Чеснов А.Ф. — В сб.: Материалы II рабочего совещания по изохронному циклотрону У-120М. ОИЯИ, Р9-6241, Дубна, 1972, с.123.
7. Акишин П.Г., Ворожцов С.Б., Шакун Н.Г. — Сообщение ОИЯИ 9-82-2, Дубна, 1983.

Рукопись поступила в издательский отдел  
21 декабря 1990 года.