

5497/2-79



сообщения
Объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

B-19

29/41-79
P9 - 12586

А.Т.Василенко, Н.Л.Заплатин, В.И.Лепилов,
А.Ф.Чеснов

ЖЕЛЕЗНО-ТОКОВЫЙ КАНАЛ ДЛЯ ФАЗОТРОНА
С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАЦИЕЙ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ

1979

Железно-токовый канал для фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля

Описана конструкция и приведены основные параметры железно-токового канала для сильноточного фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля. Детально рассматривается входная железно-токовая секция канала, приводятся результаты электрических и тепловых испытаний для основной /септум-антисептум/ и корректирующей обмоток, коаксиальных и гибких токоподводов при рабочих токах 11000 А и 3100 А, соответственно. Изложены результаты измерений магнитного поля от секции в электромагните, межполюсный зазор и полюсные наконечники которого моделировали область выводных радиусов сильноточного фазотрона. Для токов в обмотках секции, соответственно равных 10100 А и 3100 А, получено снижение магнитного поля 4500 Э, при этом возмущения магнитного поля, вносимые секцией, слабо влияют на эффективность вывода.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Iron-Current Channel for the Phasotron with the Spatial Magnetic Field Variation

The construction and main parameters of an iron-current channel for the high-current phasotron with the spatial variation of the magnetic field are described. The input iron-current channel section is considered in detail, the results of electrical and heat tests for the main (septum-antiseptum) and correcting windings, coaxial and flexible current collectors for working currents 11000A and 3100, respectively, are given. The results of magnetic field measurements from section placed in electromagnet, which pole tips and distance between poles modelled the region of extraction radii of high-current phasotron are presented. For the currents in section windings, 10100A and 3100A, respectively, the magnetic field reduction of 4500 Oe is obtained, while the magnetic field errors due to section have weak influence on the extraction efficiency.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

ВВЕДЕНИЕ

В фазотроне с пространственной вариацией магнитного поля /установка "Ф"/ на энергию протонов $E_p = 680$ МэВ и токе ускоренного пучка 50 мкА будет использован регенеративный метод заброса частиц в магнитный канал.

Эффективность регенеративного метода существенно зависит от величины заброса и эффективной толщины передней стенки /септума/ выводного канала, а также от величины эмиттанса пучка и акцептанса канала. Проведенное численное моделирование на ЭВМ процесса раскачки для амплитуд свободных колебаний $A_x \leq 3$ см и $A_z \leq 1,3$ см и определение эффективности заброса в железно-токовую секцию ^{1/} /толщина септума 0,4 см/ показали, что коэффициент заброса будет равен ~50%. Из анализа движения частиц на последних оборотах было определено, что основные потери происходят за счет увеличения вертикальной огибающей пучка, связанной с приближением мгновенной частоты аксиальных колебаний к резонансному значению $Q_z = 0,5$. Использование дополнительного регенератора в системе заброса пучка позволило понизить частоту Q_z за счет изменения среднего радиального градиента поля на орбитах частиц и увеличить коэффициент заброса до ~68% ^{2/}.

Последующие расчеты, связанные с определением оптических свойств магнитного канала ^{3/} позволили выбрать величины ослабления поля в секциях, их горизонтальные и вертикальные апертуры и требуемые градиенты для получения акцептанса канала, соответствующие эмиттансу пучка. В результате этих расчетов было найдено, что потери пучка в отклоняющем канале с входной железно-токовой секцией составят ~1/2 ÷ 5%.

Таким образом, ожидаемая величина коэффициента вывода пучка из установки "Ф", при использовании железно-токовой секции, будет равна $\sim /60 \div 65/\%$.

1. КОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ ВЫВОДА

Схема расположения элементов системы вывода пучка в камере фазотрона показана на рис. 1. Она состоит из возбуждателя Р, дополнительного регенератора R_D , регенератора R и железно-токового канала. Канал имеет в длину 215 см и занимает по азимуту угол 44° . Канал разделен на четыре криволинейных секции с параметрами, указанными в таблице 1.

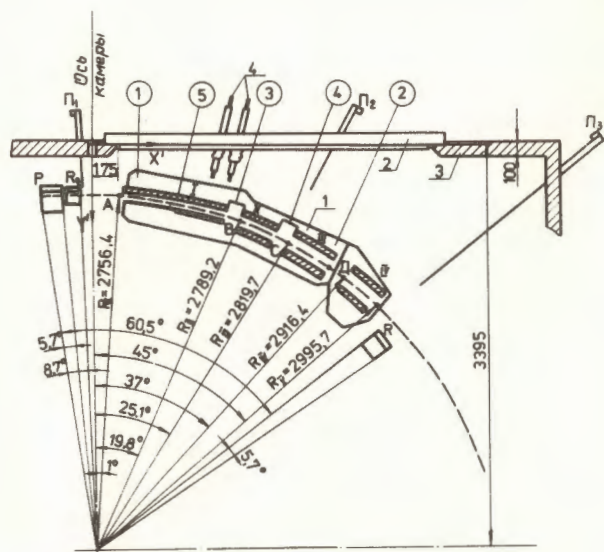


Рис. 1. Схема размещения элементов системы вывода пучка в камере ускорителя. Р - возбуждатель, R_D - дополнительный регенератор, R - регенератор, I-IV - секции канала, 1 - основная часть канала /камертон/, 2 - фланец, 3 - камера, 4 - коаксиальные токоподводы железно-токовой секции, Π_1, Π_2, Π_3 - пробники, /1/ /5/ - регулирующие тяги.

Таблица 1

№ секции	Азимут протяж. а /град./	Длина l /см/	Апертура		Радиус кривизны р /см/	Снижение поля ΔH /3/	Град. поля $d\Delta H/dr$ /3/см/
			$2a_1$ /см/	$2a_2$ /см/			
I - железно-токовая	17,7	86	1,8	2,4	406,6	4700-4500	150-30
II - ферромагнитная	4,5	28	2,2	2,4	422,0	4000	-100
III - ферромагнитная	10,0	51	2,6	2,4	495,8	5400	-100
IV - ферромагнитная	8,0	47	5,0	3,0	-	0	1000

Основой конструкции канала является С-образное основание /камертон/, которое крепится к фланцу камеры с помощью тяг /1/, /2/ и может перемещаться в горизонтальной плоскости магнита. Камертон образован из верхней и нижней плит из нержавеющей стали, соединенных вместе с помощью восьми ребер жесткости, и задней стенки, имеющей технологические отверстия для тяг, пробника и токоподводов. В камертон вставляются I, II и III секции, которые между собой фиксируются с помощью легкоъемных креплений на штифтах, а точки входа 1-й и выхода III-й секций шарнирно связаны с камертоном. Регулировка кривизны канала осуществляется с помощью промежуточных тяг /3/, /4/. Тяга /5/ предназначена для перемещения ферромагнитной пластины от центра ускорителя на 145 мм, при работе на внутреннюю мишень. Тяги /1/ ÷ /5/ имеют электропривод типа УР-6 с дистанционным управлением, который будет обеспечивать установку секций канала с точностью $\sim 0,1$ мм. IV-я секция, выполненная на отдельном кронштейне, жестко крепится к камертону и собственных внешних регулировок не имеет. Ферромагнитные секции канала имеют корпус из нержавеющей стали, в котором с помощью винтов и дюралюминиевых прокладок крепятся ферромагнитные пластины.

Для индикации пучка в процессе настройки имеется три пробника. Первый из них расположен на выходе R_D , на расстоянии 2° по азимуту от входа в железно-токовую секцию, второй - между выходом II-й и входом в III-ю секцию. Штоки этих пробников оканчиваются рамкой размером /8,0x0,4x3,6/см

для установки фотобумаги, стекла или фольги для получения радиоавтографов пучка. Каждый пробник имеет вакуумный шлюз, позволяющий вывести головку пробника из вакуумного объема и произвести перезарядку рамки. Пробник П_3 расположен на выходе IV -й секции канала и может быть использован для измерения интенсивности внутреннего и выведенного пучка. Он оборудован токосъемными изолированными водоохлаждаемыми мишенями: сплошной, высотой 10 см, и 3-ламельной, полностью перекрывающими пучок. Максимально допустимое тепловыделение на мишени - 5 кВт, а на каждой из ламелей - до 3 кВт. Общий вид железно-токового канала показан на рис. 2.

2. ЖЕЛЕЗНО-ТОКОВАЯ СЕКЦИЯ КАНАЛА

Параметры железно-токовой секции /табл. 1/ были выбраны на основании расчета выводных траекторий и огибающих пучка. Расчеты на ЭВМ, проведенные в ^{1/3/}, позволили определить геометрические размеры токовых и ферромагнитных элементов и величину токов в обмотках, позволяющих получить требуемое поле внутри и вне секции. На основании этих расчетов изготовлен прямолинейный макет секции ^{1/4/}, на котором была проверена выбранная схема охлаждения, измерена топография магнитного поля, рассмотрены возможности дополнительного шиммирования возмущений магнитного поля в области ускоренного пучка и определены технические и эксплуатационные характеристики секции. Результаты расчетов и модельных испытаний послужили основой для проектирования железно-токовой секции.

Железно-токовая секция /рис. 3/ имеет основную и корректирующую обмотки, рассчитанные на рабочий ток 11000 А и 3100 А, соответственно. Основная обмотка состоит из двух независимо охлаждаемых витков, соединенных последовательно по току, в результате чего суммарный ток в септуме равен 22000 А. Толщина септума увеличивается с 0,4 см до 1 см, начиная с расстояния 40 см от входа в секцию, что значительно снижает потребляемую мощность и уменьшает трудности, связанные с отводом тепла от входной части септума, где плотность тока равна 175 А/мм².



Рис. 2. Железно-токовый канал фазотрона: а/ вид из центра ускорителя.

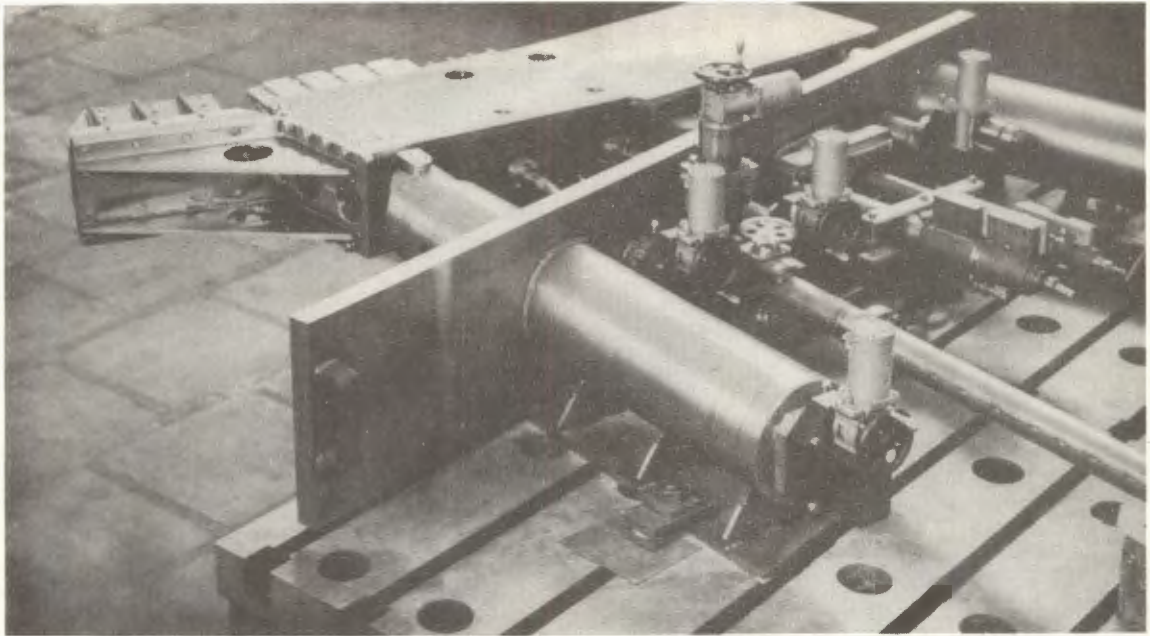


Рис. 2. Железно-токовый канал фазотрона: б/ вид со стороны фланца камеры.

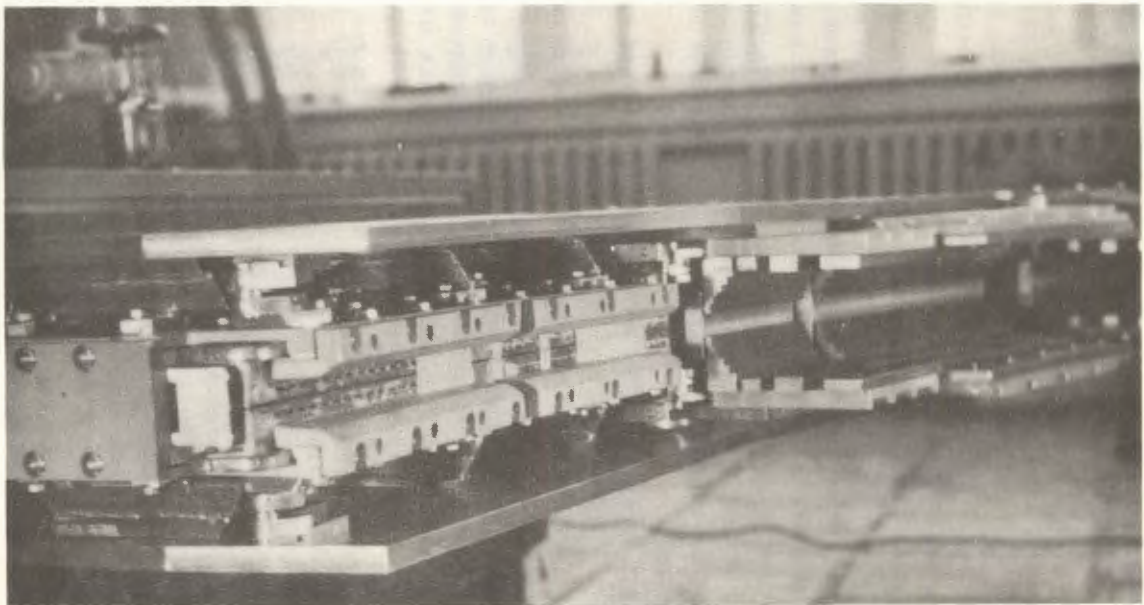


Рис. 3. Железно-токовая секция канала.

Основная обмотка состоит из медных трубок сечением $0,4 \times 0,86$ см и $1,0 \times 1,0$ см, с отверстием для охлаждения $0,2 \times 0,66$ см и $\varnothing 0,56$ см, соответственно. Корректирующая обмотка изготовлена из медной трубки сечением $1,0 \times 1,0$ см, с отверстием для охлаждения $\varnothing 0,56$ см.

Изоляция основной и корректирующей обмоток выполнена полиимидной пленкой /тип ПМ, марка А, толщина 50 мкм, ширина 2,0 см/ в два слоя. Токовые элементы секции размещаются в пазах дюралюминиевого основания, а крепление септума осуществляется с помощью уголковых прижимов. Детали корпуса секции, соприкасающиеся с токовыми обмотками, были проанодированы согласно технологии, описанной в работе^{/5/} для получения изолирующей пленки из окиси алюминия.

В настоящее время изготавливается второй вариант железно-токовой секции с оксидной изоляцией, которая будет нанесена на токовые обмотки и детали корпуса методом плазменного напыления^{/6/}.

Результаты электрических и тепловых испытаний железно-токовой секции приведены на рис. 4. Как видно из рисунка, при рабочих токах в основной $I_0 = 11000$ А и корректирующей $I_k = 3100$ А обмотках температура охлаждающей воды на выходе из коаксиальных токоподводов составляет $t_0 = 57^\circ\text{C}$ и $t_k = 52^\circ\text{C}$, при температуре воды на входе $t_B = 23^\circ\text{C}$ и перепаде давления $\Delta P = 4,1$ кг/см². Падение напряжения и потребляемая мощность на основной и корректирующей обмотках (U_1, P_1), коаксиальных (U_2, P_2) и гибких (U_3, P_3) токоподводах, а также суммарные величины ($\Sigma U, \Sigma P$) приведены в табл. 2.

Из таблицы видно, что при рабочих токах в основной и корректирующей обмотках мощность, потребляемая железно-токовой секцией, равна 105 кВт.

3. КОАКСИАЛЬНЫЕ И ГИБКИЕ ТОКОПРОВОДЫ

Коаксиальные токопроводы основной и корректирующей обмоток железно-токовой секции канала выполнены по одинаковой конструктивной схеме и отличаются только размерами. Они состоят из трех медных труб, вставленных одна в другую,

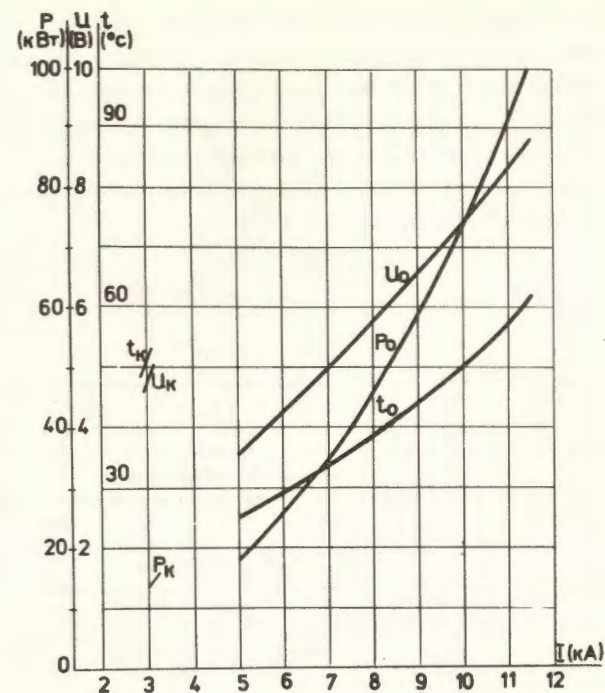


Рис. 4. Падение напряжения, потребляемая мощность и температура охлаждающей воды в основной / U_0, P_0, t_0 / и корректирующей / U_k, P_k, t_k / обмотках секции в зависимости от тока.

металло-керамических узлов типа "Баклан" или "Ирис"^{/7/}, сильфонов из нержавеющей стали, токовых клемм с резьбовыми оливками для подвода воды и крышками для крепления к фланцу камеры. Внутренняя труба является прямым проводником по току и напорной ветвью по охлаждению, две наружные трубы — обратным проводником по току, а пространство между ними используется как сливная ветвь цепи охлаждения. Токопроводы изолированы асбоцементными и стеклотекстолитовыми кольцами толщиной ~0,45 см и высотой 3,0 см, расположенными на внутренней трубе, а разделение по вакууму осуществляется металло-керамическими узлами. Сопротивление изоляции токопроводов для основной и корректирующей обмоток составляет ~3 МОм. Токопроводы с помощью кронштейнов жестко связаны

с корпусом секции, а с фланцем камеры - через сильфоны для обеспечения требуемой регулировки. Гибкие наружные токоподводы представляют собой многопроволочные медные проводники марки ПЩ, сечением 3120 мм^2 для основной и 900 мм^2 для корректирующей обмоток, длиной $\sim 50 \text{ см}$. Падение напряжения и выделяемая мощность на коаксиальных и гибких токоподводах приведены в табл. 2.

Таблица 2

I /А/	U ₁ /В/	P ₁ /кВт/	U ₂ /В/	P ₂ /кВт/	U ₃ /В/	P ₃ /кВт/	ΣU /В/	ΣP /кВт/
Основная обмотка								
11000	7,4	81,4	0,7	7,7	0,1	1,1	8,2	90,2
Корректирующая обмотка								
3100	4,1	12,71	0,4	1,24	0,3	0,93	4,8	14,88

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЖЕЛЕЗНО-ТОКОВОЙ СЕКЦИИ КАНАЛА

Измерения магнитного поля железно-токовой секции канала проводились на стенде, созданном на базе электромагнита СП-57 / $\phi_n=115 \text{ см}$ /, межполюсный зазор и полюсные наконечники которого моделировали область выводных радиусов установки "Ф". Эксперимент выполнялся при индукции внешнего поля $B_0 \approx 9500 \text{ Гс}$ /величина поля в зоне вывода установки "Ф" соответственно равна $\bar{B}=16000 \text{ Гс}$ /.

Распределение поля в средней плоскости зазора на расстоянии $x=20 \text{ см}$, рассчитанное на ЭВМ с помощью программы POISSON^{8/} и измеренное Холловским магнитометром с относительной точностью 0,1%, показано на рис. 5. На этом же рисунке приведена схема расположения секции относительно полюсов магнита.

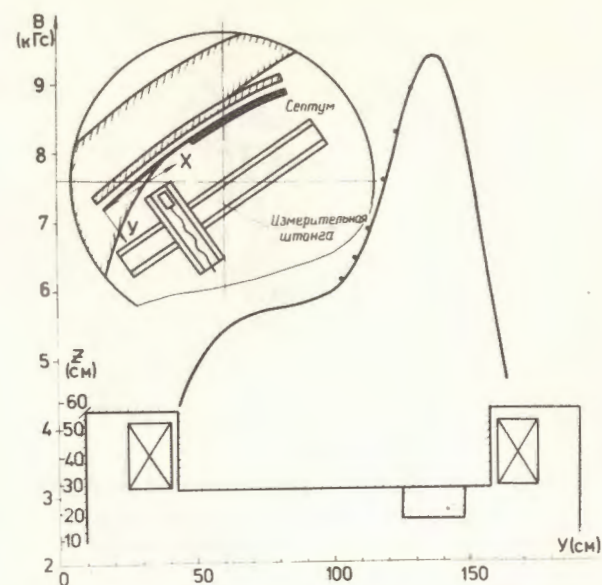


Рис. 5. Схема расположения железно-токовой секции относительно полюсов магнита СП-57. Расчетное /-----/ и измеренное (o o o) магнитное поле в средней плоскости зазора магнита на расстоянии 20 см от входа в секцию.

Результаты измерения магнитного поля железно-токовой секции канала приведены на рис. 6, 7. Кривая 1 рис. 6 соответствует рабочим значениям токов в основной и корректирующей обмотках секции. Значительные возмущения поля вблизи септума / $\sim 120 \text{ Гс}$ / обусловлены несоответствием радиальных апертур в расчете^{8/} / $\Delta R=18 \text{ мм}$ / и в эксперименте / $\Delta R=19,5 \text{ мм}$ /.

Требуемые результаты по шиммированию возмущений поля от секции /кривые 2/ получены при значениях токов в обмотках $I_0=10100 \text{ А}$ и $I_K=3100 \text{ А}$, соответственно. Видно, что величины неотшиммированного поля и его градиента в области циркулирующего пучка соответственно равны $\Delta B \approx 20 \text{ Гс}$ и $\frac{d\Delta B}{dr} \approx 25 \text{ Гс/см}$ для среднего сечения входной части и $\Delta B \approx 30 \text{ Гс}$, $\frac{d\Delta B}{dr} \approx 15 \text{ Гс/см}$ / $y=3,5 \text{ см}$ / для выходной части секции.

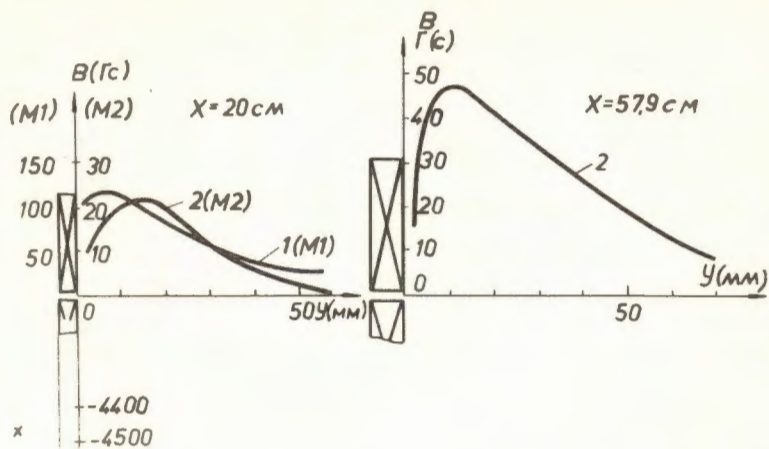


Рис. 6. Распределение поля для средних сечений входной и выходной частей секции. 1 - токи в основной и корректирующей обмотках равны $I_0 = 11000$ А, $I_K = 3100$ А. 2 - $I_0 = 10100$ А, $I_K = 3100$ А.

Распределение магнитного поля в области шиммирования вдоль длины входной части железно-токовой секции приведено на рис. 7. При расположении ферромагнитной пластины, как показано на схеме, характер распределения возмущающего поля совпадает с расчетным, полученным в работе^{/3/}.

Оценки показали, что наличие возмущений поля от секции в области циркулирующего пучка может привести к снижению эффективности системы вывода на $2 \div 5\%$.

Авторы выражают благодарность профессору В.П.Дмитриевскому за постоянное внимание к данной работе; Ф.В.Гугнину, В.Г.Сазонову, В.Н.Власову и Н.Н.Жукову - за участие в изготовлении и монтаже электромагнитного канала.

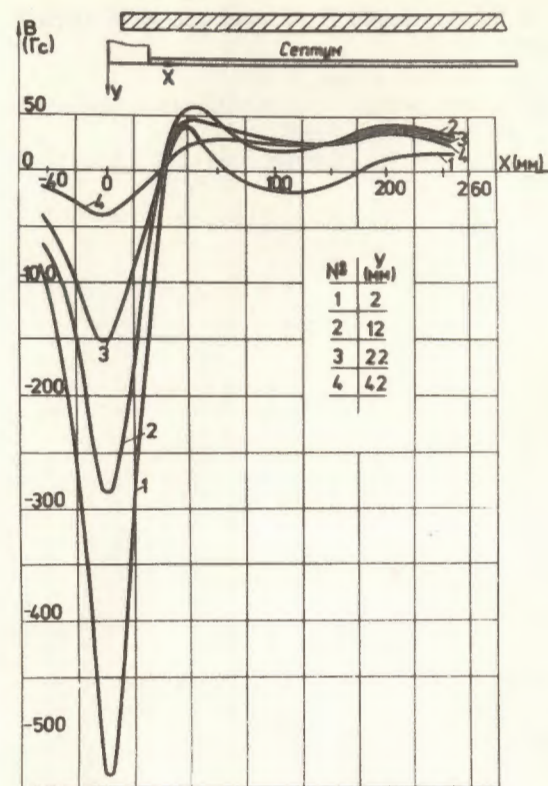


Рис. 7. Распределение поля в области шиммирования вдоль длины железно-токовой секции канала / $I_0 = 10100$ А, $I_K = 3100$ А/.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ворожцов С.Б. и др. Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1973, с. 99-103.
2. Ворожцов С.Б. и др. ОИЯИ, Р9-7954, Дубна, 1974.
3. Заплатин Н.Л., Самсонов Е.В., Чеснов А.Ф. ОИЯИ, Р9-9023, Дубна, 1975.
4. Василенко А.Т. и др. ОИЯИ, Р9-9119, Дубна, 1975.

5. Ахманов В.В., Заплатин Н.Л., Чеснов А.Ф. ОИЯИ, Р9-10306, Дубна, 1976.
6. Plasma Technik AG. Switzerland, 1974.
7. Альбом чертежей металлокерамических изделий. Изд. ИАЭ, им. И.В.Курчатова, М., 1967.
8. Ворожцов С.Б. и др. ОИЯИ, В1-11-12070, Дубна, 1978.

*Рукопись поступила в издательский отдел
25 июня 1979 года.*