

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



29/12-75

С 34503
3-328

P9 - 9023

Н.Л.Заплатин, Е.В.Самсонов, А.Ф.Чеснов

3732/2-75

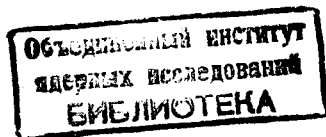
ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ
СИСТЕМЫ ВЫВОДА ПУЧКА ИЗ ФАЗОТРОНА
С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАЦИЕЙ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
ЖЕЛЕЗНО-ТОКОВОГО КАНАЛА

1975

P9 - 9023

Н.Л.Заплатин, Е.В.Самсонов, А.Ф.Чеснов

**ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ
СИСТЕМЫ ВЫВОДА ПУЧКА ИЗ ФАЗОТРОНА
С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАЦИЕЙ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
ЖЕЛЕЗНО-ТОКОВОГО КАНАЛА**



Заплатин Н.Л., Самсонов Е.В., Чеснов А.Ф.

P9 - 9023

Выбор параметров элементов системы вывода пучка из фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля при использовании железо-токового канала

В работе приведены результаты расчёта магнитного поля элементов системы заброса и отклонения пучка при использовании железо-токовой секции канала. Железо-токовая секция при мощности питания ~ 90 кВт обеспечивает снижение магнитного поля 4700 Э для входной части (толщина септума 0,4 см) и 4500 Э - для выходной части секции (толщина септума 1 см). При этом возмущения магнитного поля, вносимые каналом, слабо влияют на эффективность заброса.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований
Дубна 1975

Zaplatin N.L., Samsonov E.V., Chesnov A.F. P9 - 9023

Selection of the Parameters of the Elements of a Beam Extraction System of a Phasotron with a Space Variation of a Magnetic Field Using the Iron Current Extraction Channel.

The results of calculation of the magnetic field of the elements of a system for beam extraction and deflection using the iron current channel are presented. The iron current section of the channel provides, at a power supply of ~ 90 kWt, the magnetic field dropoff of 4700 Oe for an input part of the section (septum thickness being 0.4 cm) and of 4500 Oe for an output one (septum thickness being 1.0cm). In this case the magnetic field perturbations, due to the channel, affect weakly the extraction efficiency.

The investigation has been performed at the

Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research
Dubna 1975

В работе /1/ показано, что регенеративная система вывода пучка из фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля при использовании ферромагнитного канала позволяет получить коэффициент вывода $\sim 14\%$. Такая низкая эффективность выводной системы, прежде всего, связана с большой переходной областью на входе в магнитный канал, а значит, и с требованием большого радиального разделения на последних орбитах. Это приводит к существенным потерям частиц за счет роста амплитуд свободных аксиальных колебаний.

В настоящее время для реконструируемых синхротронов /2,3/ на энергии протонов в сотни мегаэлектронвольт разрабатываются каналы, в которых в качестве первых секций используются токовые. Токовые секции более сложны в эксплуатации, чем ферромагнитные, однако они позволяют получить переходную зону, близкую к толщине септума /3:5/мм. Эффективность выводной системы при использовании таких каналов для величин заброса $\sim 1,5-2,0$ см составит /67:85% без учета аксиальных потерь пучка.

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ проведен анализ различных типов токовых секций канала, в результате которого для фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля на энергию ускоренных протонов ~ 670 МэВ предполагается использовать в качестве первой секции канала железо-токовую /4,5/. Основным отличием ее от известного коаксиального канала /2/ является замена коаксиальной токовой линии на ферромагнитную пластину с сохранением тонкого септума. Это позволило существенно снизить потребляемую мощность

при одинаковом снижении поля в канале, или, что то же самое, получить большее снижение поля в канале при равной потребляемой мощности. В качестве примера можно сравнить разрабатываемые каналы для реконструируемых синхротронов в ОИЯИ и ЦЕРНе. При примерно равной потребляемой мощности $P \approx 80 \text{ кВт}$, снижение поля в железно-токовом канале $\Delta H \approx 4,7 \text{ кГс/}$ будет в 2,5 раза больше, чем для коаксиального $\Delta H \approx 1,9 \text{ кГс/}$.

Предварительные численные расчеты на ЭВМ регенеративной системы заброса частиц на вход железно-токовой секции канала показали, что при толщине септума $d = 4 \text{ мм}$ можно получить коэффициент вывода $\approx 50\%$ ^{/6/}. В этих расчетах было показано, что оптимальные значения градиентов поля в возбуждатель и регенераторе, при их азимутальной протяженности $\alpha = 5,7^\circ$, равны 310 и 270 Э/см соответственно.

В данной работе приводятся результаты детальной проработки элементов схемы вывода с использованием железно-токовой секции канала, описанной в^{/6/}. Новым элементом в этой схеме является дополнительный регенератор с градиентом поля 350 Э/см, $\alpha = 3^\circ$, устанавливаемый в непосредственной близости за возбуждителем /по движению пучка/. Детальный анализ модифицированной системы заброса частиц в канал^{/7/} показал, что ее эффективность может быть увеличена до 68%, при незначительном изменении сил возбуждателя и регенератора.

Схема размещения элементов системы вывода пучка относительно спиральных шимм показана на рис. 1, а их параметры приведены в табл. 1.

На этом же рисунке показаны области возмущений магнитного поля ускорителя от этих элементов, огибающая пучка (N - 1) оборота и осевая линия отклоненного пучка. Внешнее магнитное поле в области вывода и отклоненного пучка характеризуется графиками рис. 2.

Из этих рисунков видно, что:

1/ Возбудитель и регенератор находятся в относительно однородной области поля $H \approx 17400 \text{ Э}$. Поле на радиусе размещения дополнительного регенератора составляет величину $H \approx 16700 \text{ Э}$ при градиенте $\frac{dH}{dr} = 146 \text{ Э/см}$.

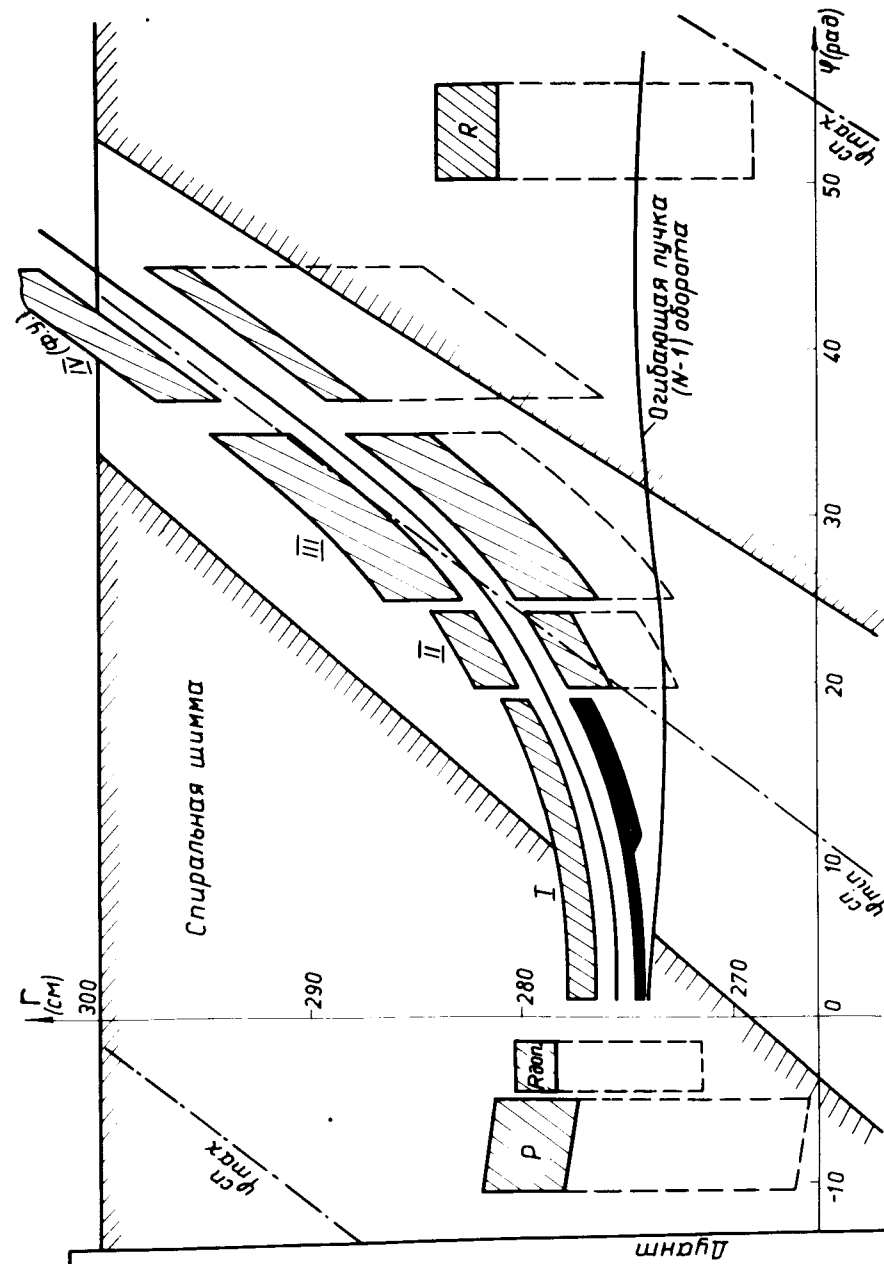


Рис. 1. Схема размещения элементов системы вывода.

Таблица 1

Элементы системы вывода	Азимутальная прогуженность α (град)	Длина l (см)	ΔH (Э)	$\frac{d\Delta H}{dr}$ (Э/см)	Радиус кривизны ρ (см)
Возбудитель	5,7-6,5	28-32	-	310	-
Регенератор	5,7-8,0	28-40	-	270	-
Дополнительный регенератор	3,0	15	-	350	-
Магнитный канал					
I секция (железотоковая)	17,7	86	4700/4500	150/(0+30)	406,55
II секция (ферромагнитная)	4,5	28	4000	-100	421,97
III секция (ферромагнитная)	10,0	51	5400	-100	495,76
IV секция (ферромагнитная)	8,0	47	0	1100+1200	-

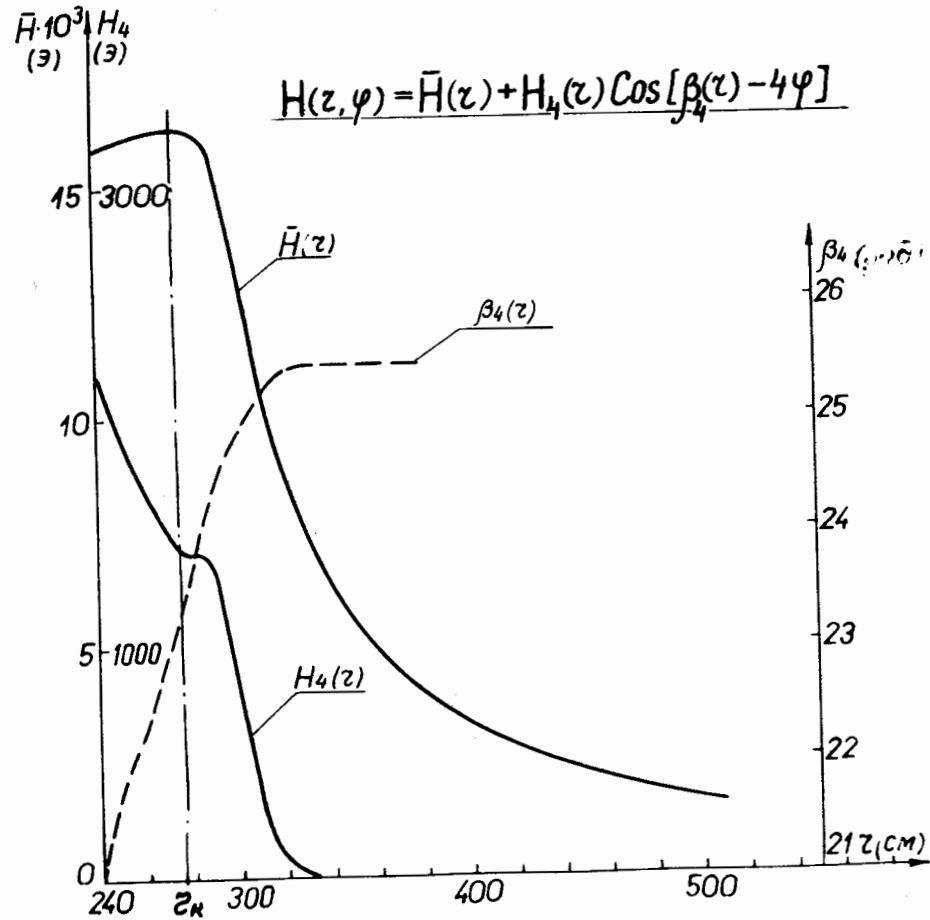


Рис. 2. Зависимость среднего магнитного поля, амплитуды и фазы 4 гармоника поля от радиуса.

2/ Железотоковая секция канала пересекает линию, соответствующую внутренней границе спиральной шиммы, и находится в резко неоднородном внешнем магнитном поле фазотрона $\frac{dH}{dr} \approx 100 \div 150$ Э/см

3/ Ферромагнитные секции канала /II и III /находятся вблизи линии $\phi_{\min}^{сн}$, т.е. в области однородного минимального внешнего поля $H \approx 14200$ Э.

4/ IV секция размещается около линии $\phi_{\min}^{сн}$ и края полюсного наконечника /R = 300 см/, где величины внешнего поля и его градиента соответственно равны

$$H \approx 13300 \text{ Э и } \frac{dH}{dr} \approx 150 \text{ Э/см.}$$

5/ Траектории частиц (N-1) оборота пересекают области возмущений от секций магнитного канала.

СИСТЕМА ЗАБРОСА ПУЧКА

Поперечное сечение ферромагнитных брусков возбуждителя, регенератора и дополнительного регенератора, а также распределение магнитных полей от них приведены на рис. 3,4.

Основным требованием к элементам системы заброса является постоянство градиента в зоне раскочки для исключения связи между радиальным и аксиальным движением. На этих рисунках нанесены кривые /пунктир/

градиента поля $\frac{d\Delta H}{dr}$, соответствующие принятым в

расчете одного из вариантов системы раскочки /7/. Видно, что рассчитанные поля хорошо описывают требуемые. Постоянство градиента поля для возбуждителя и регенератора выполняется в интервале $\Delta r = 7,5$ см, а переходная зона составляет $\Delta r_n = 4$ см. Регулирование силы возбуждителя и регенератора в процессе настройки системы на оптимум предполагается осуществить за счет изменения их длины, как указано в табл. 1.

МАГНИТНЫЙ КАНАЛ

Выбранные параметры системы заброса и отклонения пучка /магнитный канал/ обеспечивают попадание выве-

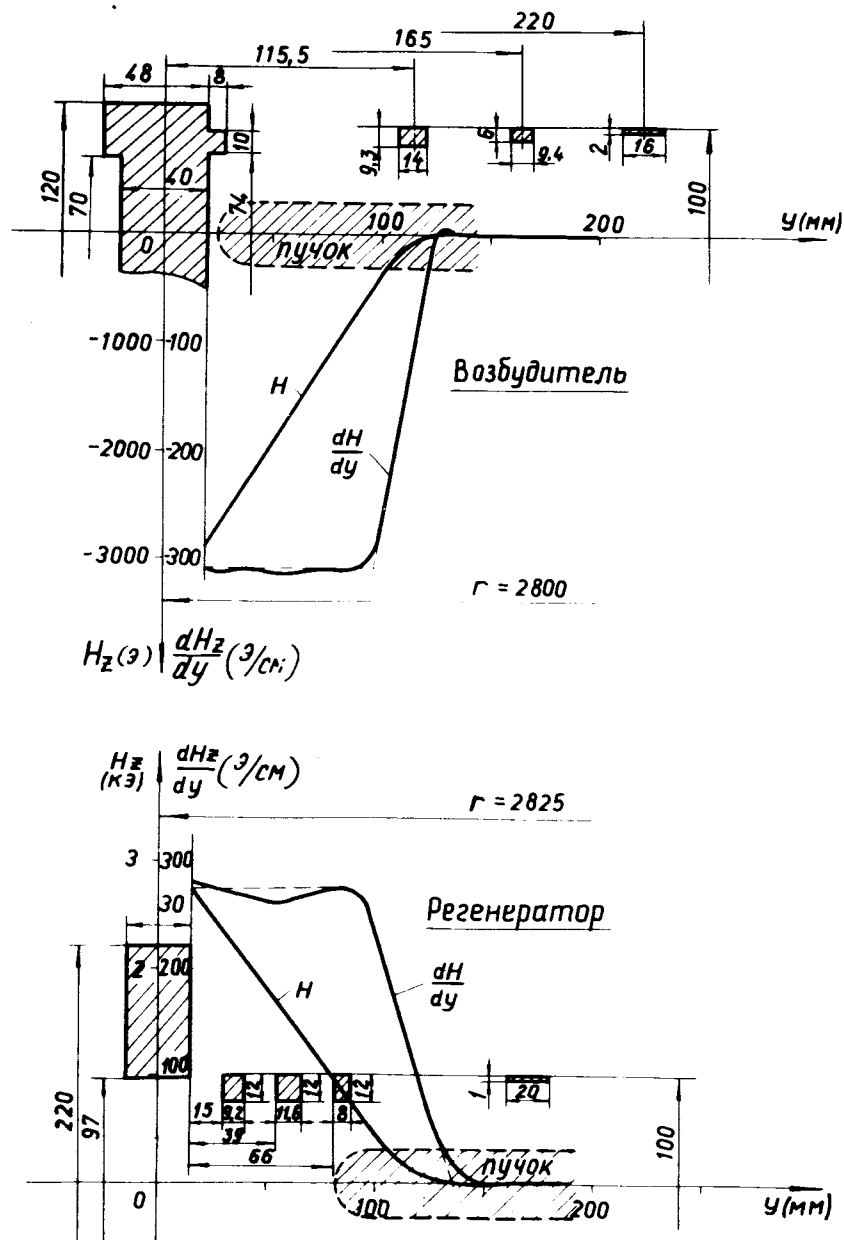


Рис. 3. Поперечное сечение и расчетное распределение поля для возбуждителя и регенератора.

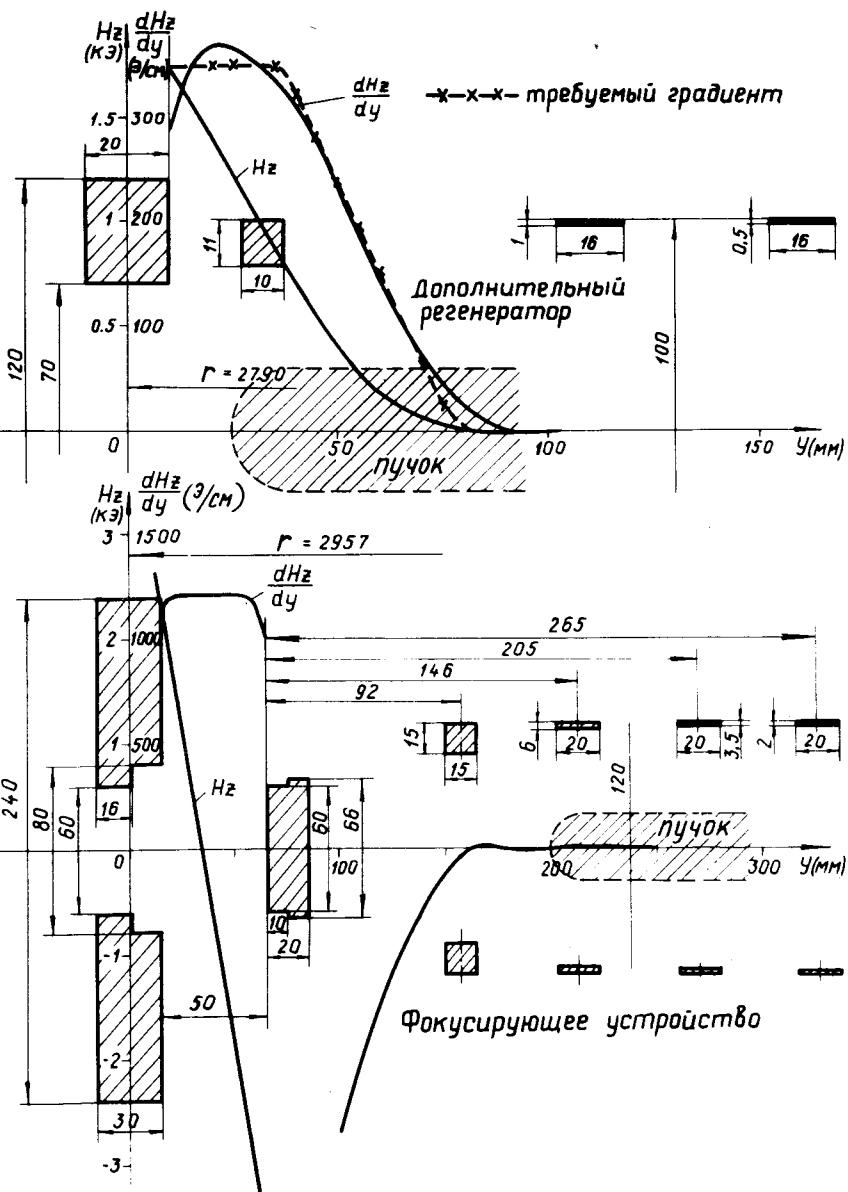


Рис. 4. Поперечное сечение и расчетное распределение поля для дополнительного регенератора и фокусирующего устройства.

денного пучка на вход в первую линзу /Л1/ протонного тракта № 6 установки "Ф".

Величина снижения поля в секциях канала подбиралась путем расчета выводных траекторий, а требуемые радиальная и вертикальная апертуры канала - из расчета огибающих пучка. В качестве исходных данных для проведения этих расчетов использовались частицы на фазовой плоскости r' и $z z'$, полученные в работе /7/ на входе в канал, и эмиттансы $\epsilon_r = \epsilon_z = 20 \pi$ мм мрад/, найденные для этих частиц /рис. 5/.

При анализе фокусирующих свойств канала рассматривался тракт проводки пучка, который состоит из секций магнитного канала с учетом рассеянного поля ускорителя. Величина и знак градиентов в железно-токовой секции и в фокусирующем устройстве, а также необходимые апертуры в первом приближении были подобраны по программе FIELD/8/. Весь тракт проводки пучка был представлен в виде поворотных магнитов с азимутальной протяженностью 1,15 град с варьруемым градиентом поля в секциях канала и фокусирующем устройстве. В результате этих расчетов получены огибающие пучка в радиальном и вертикальном направлениях, а также преобразование радиального и вертикального эмиттанса в поле канала и рассеянном магнитном поле ускорителя /рис. 6/. Кривая 1 показывает размер огибающей пучка в радиальном и вертикальном направлениях при градиентах поля в секциях канала и фокусирующем устройстве, равных нулю. Радиальный и вертикальный размеры пучка на входе в линзу Л1 соответственно равны 10,5 и 2,5 см /апертура линзы $\phi = 15$ см/. При градиенте поля

в железно-токовой секции, равном $\frac{dH}{dr} = 150$ Э/см

/кривые 3/, радиальный размер пучка в канале уменьшается с 1,8 см на входе до 1,4 см на выходе III секции / $\phi = 34^\circ$ /, а на линзе Л1 становится равным 5,6 см. Вертикальный размер пучка в этих же точках соответственно равен 1,2; 1,3; и 2,4 см. Создание радиально-фокусирующего градиента в железно-токовой секции канала связано с увеличением потребляемой ею мощности и усложнением конструкции. Поэтому величина градиента в

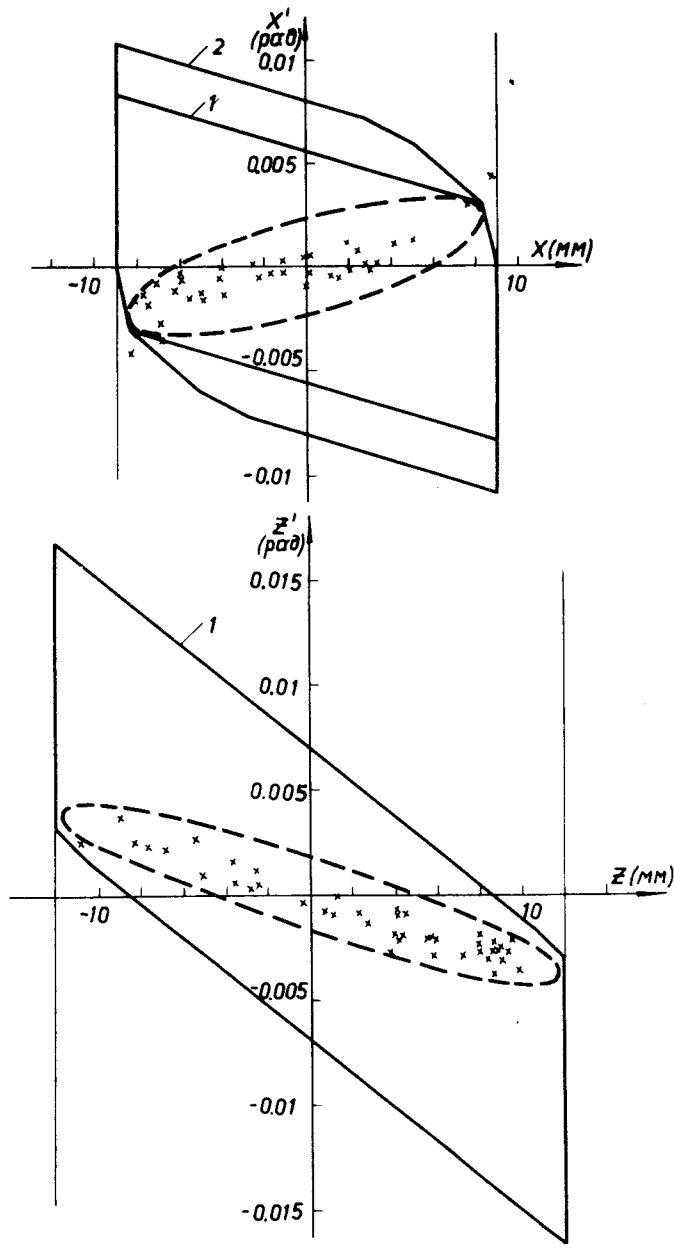


Рис. 5. Эмиттансы пучка на фазовой плоскости xx' и zz' на входе в магнитный канал.

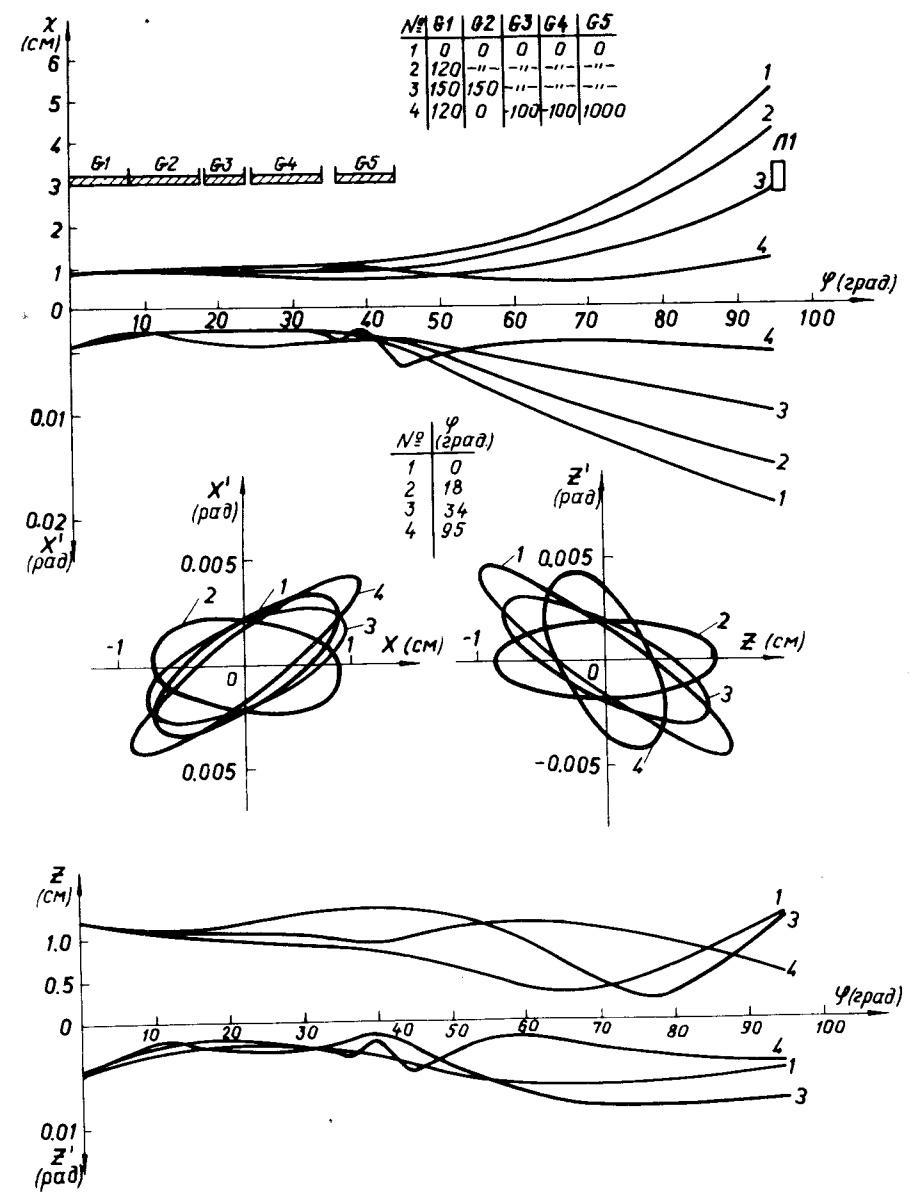


Рис. 6. Огибающие пучка и фазовые эллипсы вдоль осевой траектории вывода.

секции была выбрана равной $\frac{d\Delta H}{dr} = 120 \text{ Э/см}$, что

позволяет сохранить входные размеры пучка по длине канала. При этом дальнейшая фокусировка пучка на линзе Л1 осуществляется с помощью фокусирующего устройства /IV секция/. Один из оптимальных случаев в выборе градиентов поля в секциях канала и в фокусирующем устройстве приведен на этом же рисунке /кривые 4/. При градиентах поля, соответственно равных 120; 0; -100; -100 и 1000 Э/см, пучок сохраняет свои размеры по длине канала, а на входе в линзу Л1 его размеры в r и z -направлениях соответственно равны 2,2 и 1,1 см. Для этого случая приведено преобразование радиального и вертикального эмиттансов пучка вдоль выводной траектории на азимуте $\phi = 0^\circ$; $\phi = 18^\circ$; $\phi = 34^\circ$ и $\phi = 95^\circ$ соответственно.

Выбранные радиальные и вертикальные апертуры секций канала приведены в табл. 2.

Таблица 2

№ секции	Δr (см)	Δz (см)
I железно-токовая	1,8	2,4
II ферромагнитная	2,2	2,4
III ферромагнитная	2,6	2,4
IV ферромагнитная	5,0	3,0

Характеристика пропускной способности канала при выбранных градиентах вдоль него дана на рис. 5, где приведены аксептансы канала для двух случаев: 1/ $\Delta r_I = \Delta r_{II} = \Delta r_{III} = 1,8 \text{ см}$, $\Delta z = 2,4 \text{ см}$; 2/ $\Delta r_I = 1,8 \text{ см}$, $\Delta r_{II} = 2,0 \text{ см}$, $\Delta r_{III} = 2,6 \text{ см}$, $\Delta z = 2,4 \text{ см}$. В результате несогласования радиального эмиттанса ускорителя и аксептанса канала ожидаемые потери пучка составят $\approx 2-5\%$ от заброшенного в канал.

ЖЕЛЕЗНО-ТОКОВАЯ СЕКЦИЯ КАНАЛА

Схема размещения и принятые размеры элементов железно-токовой секции канала для двух сечений показаны на рис. 7. Обмотка секции состоит из двух основных витков, по которым протекает ток, равный 11000 А, и двух корректирующих - с током 3100 А. Выбор столь высокого значения тока в основной обмотке обусловлен желанием исключить использование изоляции на входной части септума из-за высокого уровня радиации, обусловленного попаданием ускоренных протонов / $\sim 25\%$ на септум канала. В качестве изоляции вне области пучка может быть использована неорганическая изоляция, обладающая высокой радиационной стойкостью /окись алюминия, полиимидная пленка/. Утолщение септума до 10 мм, начиная с расстояния 40 см от входа в секцию, позволило снизить потребляемую мощность канала и уменьшить трудности, связанные с отводом тепла от входной части септума, где плотность тока равна $j = 170 \text{ А/мм}^2$.

Выбор параметров железно-токовой секции канала проводился на ЭВМ с помощью программы CHENEL. Эта программа позволяет рассчитывать магнитное поле токовых проводников прямоугольного сечения и ферромагнитных брусков в предположении равномерного намагничивания с учетом отражений в полюсах электромагнита.

Необходимое снижение магнитного поля в секции определяется требуемой апертурой для пучка на входе, принятой длиной / $\ell = 86 \text{ см}$ / и получением необходимого разделения между орбитами на выходе, достаточного для размещения последующей ферромагнитной секции канала с величиной снижения поля $\Delta H = 4000 \text{ Э}$.

На рис. 7 приведены результаты расчета магнитного поля для входной и выходной части секции с учетом реального сечения токовых элементов для средней плоскости канала $z=0$. Видно, что снижение поля внутри секции составляет $\Delta H = 4700$ Э и $\Delta H = 4500$ Э для областей с толщиной септума 4 и 10 мм. Соответствующие величины градиентов равны ~ 150 Э/см/фокусирующий/ и ~ 30 Э/см/дефокусирующий/. Как видно из рисунка, максимальное возмущение магнитного поля фазотрона электромагнитной секцией канала в области циркулирующего пучка не превысит 30 Э для входной и составит менее 10 Э для выходной части секции. Искажения магнитного поля в зависимости от z внутри и вне секции для двух сечений показаны на рис. 8,9. Из этих рисунков видно, что возмущения, обусловленные неравномерным распределением тока по высоте септума, вызванного наличием каналов для охлаждения, проявляются лишь в непосредственной близости от септума ≈ 1 мм/. Величина этих возмущений достигает значения ≈ 80 Э, для входной части секции /рис. 8/ и является незначительной для выходной /рис. 9, кривые 10,11,12/.

Детальный расчет магнитного поля от выбранной конфигурации железно-токовой секции был проведен на ЭВМ с помощью программы VOLINT, которая позволяет рассчитывать магнитное поле от токовых проводников конечной длины произвольного поперечного сечения и ферромагнитных брусков в форме параллелепипеда в предположении их равномерного намагничивания. С помощью этой программы получено распределение магнитного поля внутри и вне канала с учетом токовых подводов и токовых переходов септум - антисептум /рис. 10/. Кривые 1 и 2 характеризуют поле внутри канала на расстоянии 3 мм от ферромагнитной пластины и 1 мм - от септума. Видно, что для входной части канала имеется радиально-фокусирующий градиент поля величиной

$\frac{d\Delta H}{dr} = \sim 100 \div 150$ Э/см, который в выходной части /толщина септума 10 мм/ становится равным

$\frac{d\Delta H}{dr} = \sim 30 \div 0$ Э/см. В области шиммирования,

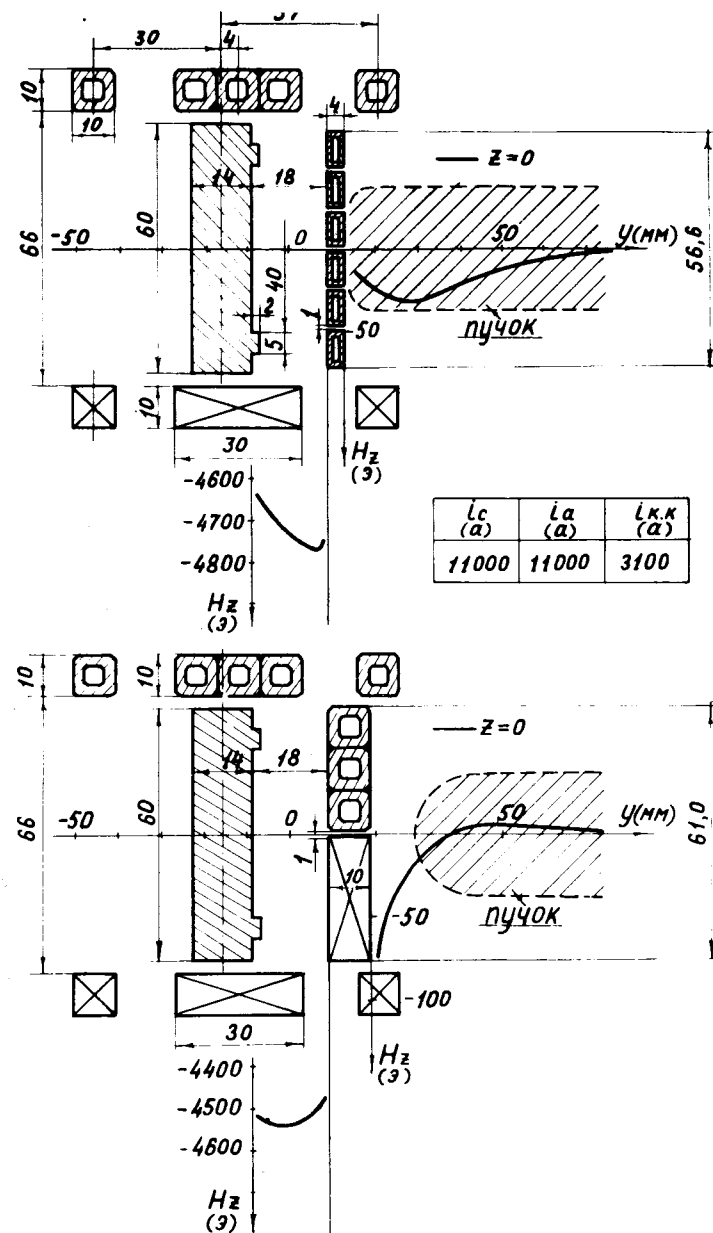


Рис. 7. Поперечные сечения и распределения поля для входной и выходной части железно-токовой секции канала.

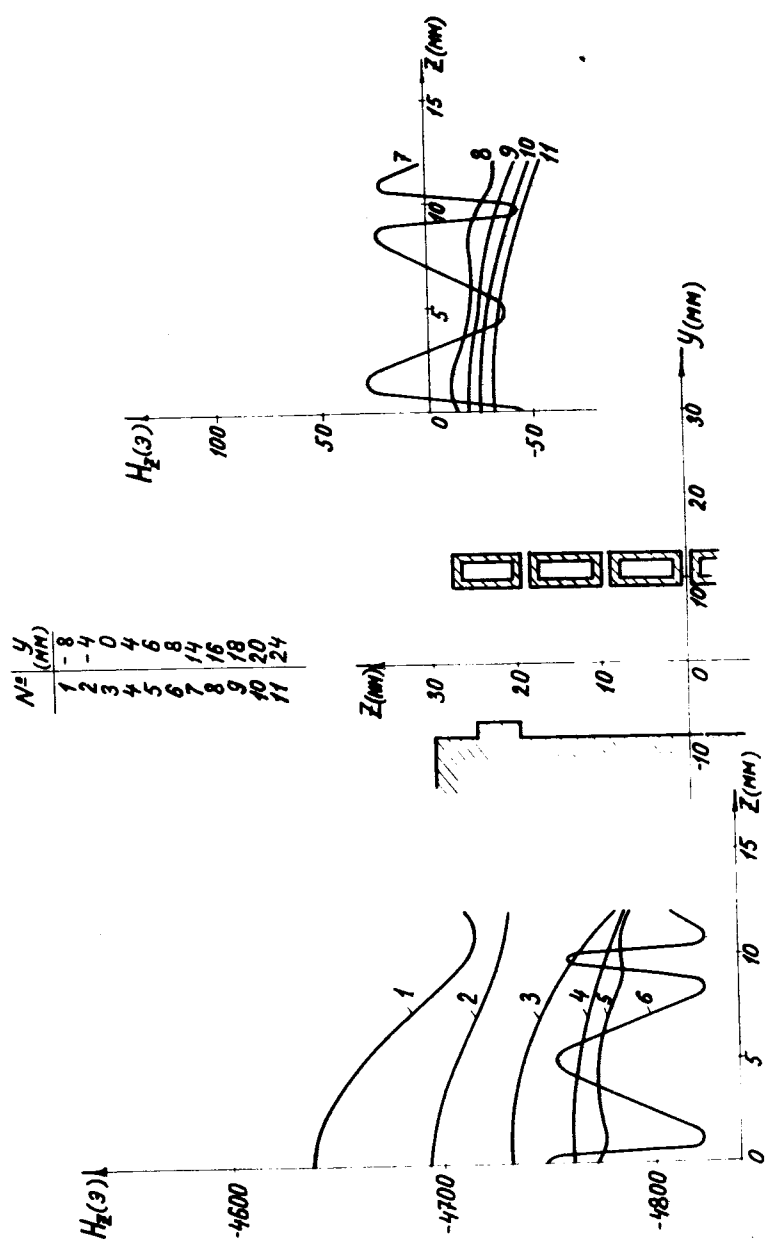


Рис. 8. Распределение магнитного поля для входной части железно-поковой секции канала в зависимости от z .

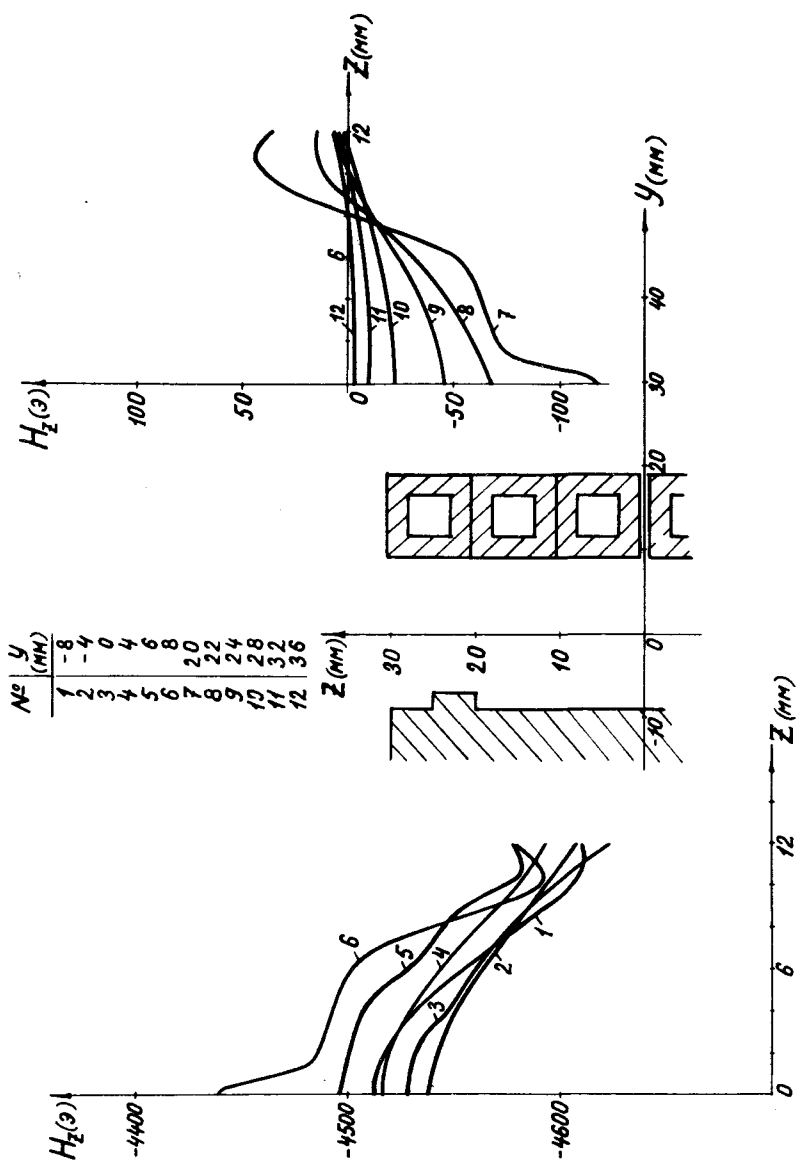


Рис. 9. Распределение магнитного поля для выходной части железно-поковой секции канала в зависимости от z .

на входе в секцию, наблюдаются выбросы поля противоположного знака величиной - 1000; +500 Э, протяженность которых в радиальном направлении /ось X/ соответственно равна 3 и 1,5 см, а в азимутальном /ось Y/ 10 и 5 см. Величину и протяженность выбросов поля можно регулировать с помощью ферромагнитной пластины. Отодвигая ферромагнитную пластину на 3 см от входа в секцию, величину положительного выброса можно установить равной 1080 Э протяженностью по x и y соответственно 3 и 10 см/кривые 3,4 и 5, пунктир/. При этом величина отрицательного выброса уменьшается до -480 Э, а его протяженность по x и y становится равной 1,5 и 5 см соответственно.

Выбросы поля могут быть представлены как дополнительные возбудитель или регенератор с нелинейным градиентом, максимальная величина которого равна ~500 Э/см. Наличие выбросов поля связано с несоответствием кривых спада ферромагнитной пластины и токовых элементов.

ФЕРРОМАГНИТНЫЕ СЕКЦИИ КАНАЛА

Поперечные сечения II, III и IV ферромагнитных секций канала приведены на рис. 4 и 11. Параметры II и III секций выбраны на основании результатов, полученных в работе /1/, по расчету и экспериментальному исследованию распределения поля от секций ферромагнитного канала установки "Ф". Из рис. 11 видно, что в области циркулирующего пучка возмущения поля составляют не более /25-30/ Э, что находится в пределах точности эксперимента. Геометрические размеры и распределение поля фокусирующего устройства /рис. 4/ определялись на основании расчетов магнитного поля от ферромагнитных брусков, в предположении их равномерного намагничивания. Из этого рисунка следует, что требуемый фокусирующий градиент

$\frac{dH_z}{dr} \approx 1000 \text{ Э/см}$ может быть

получен без возмущений поля в зоне циркулирующего пучка.

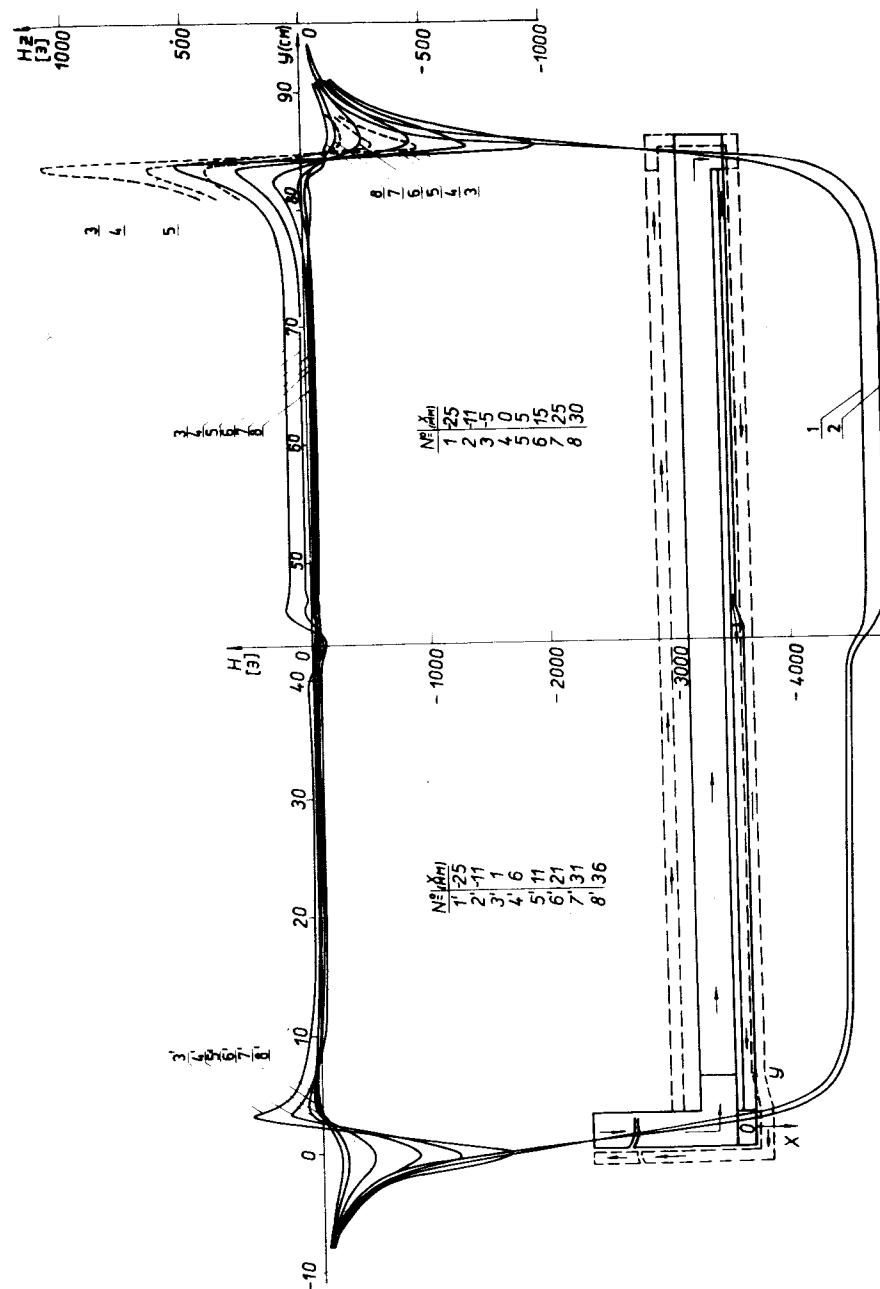


Рис. 10. Распределение магнитного поля по длине железно-железковой секции.

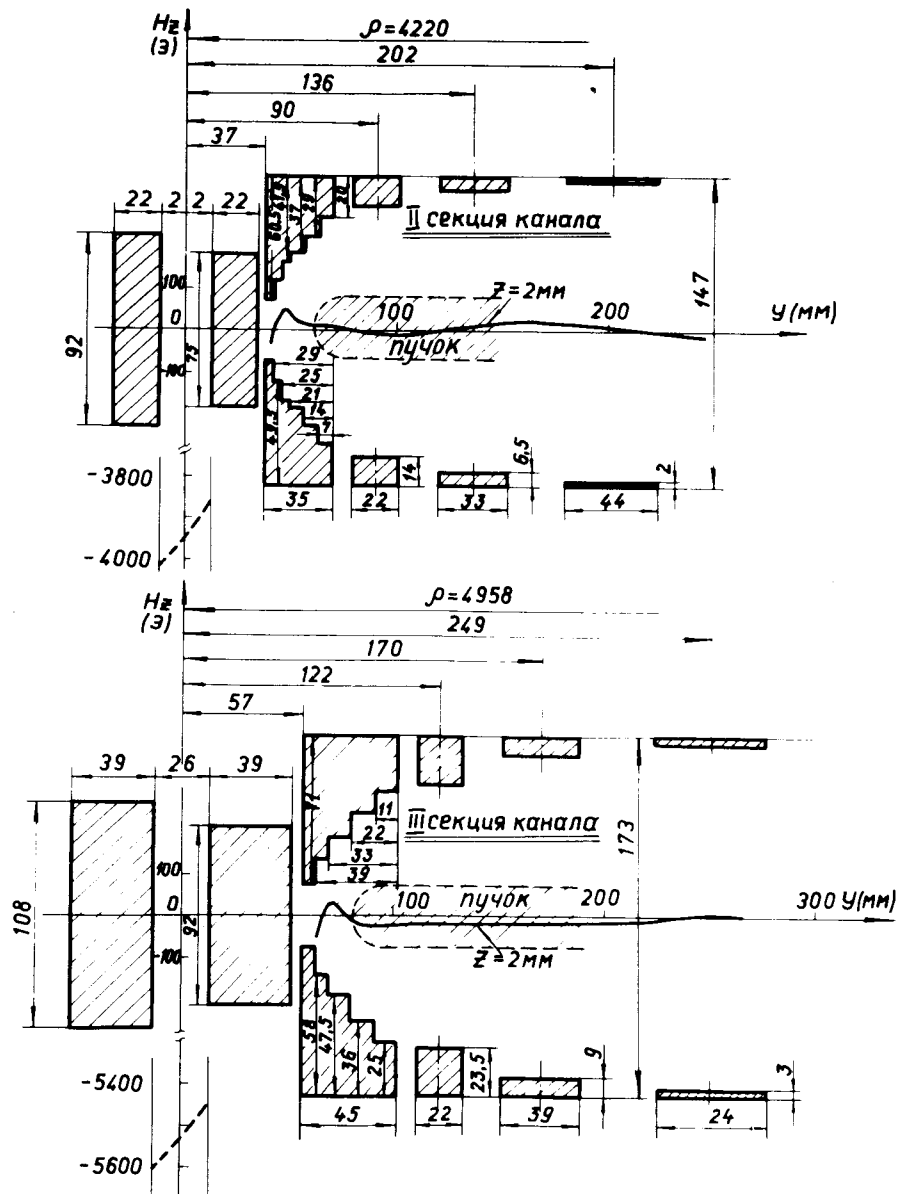


Рис. 11. Поперечное сечение и распределение поля для ферромагнитных секций / II и III / канала.

ВЫВОДЫ

На основании расчетов магнитного поля элементов системы вывода из установки "Ф" с использованием железно-токовой секции канала, а также расчетов по трассировке пучка через канал получены следующие результаты:

1. Определены все необходимые параметры элементов системы вывода.

2. Для случая начала раскачки, соответствующей энергии $E_H = 670 \text{ МэВ}$, система вывода может быть настроена на величину заброса в канал $\Delta r = 1,75 \text{ см}$ и $\Delta r = 2 \text{ см}$ путем незначительного изменения $\approx 10\%$ угловой протяженности возбуждителя и регенератора.

3. Настройка системы вывода на начальную энергию раскачки $E_H = 660 \text{ МэВ}$ может быть достигнута путем изменения параметров возбуждителя, для того чтобы обеспечить зону раскачки $L = 14 \text{ см}$ вместо $10,5 \text{ см}$, как это имеет место для $E_H = 670 \text{ МэВ}$.

4. Показано, что потери пучка в отклоняющем канале составят $\approx 2-5\%$.

Литература

1. В.П.Дмитриевский, Н.Л.Заплатин, Г.П.Лещенко, А.Ф.Чеснов. ОИЯИ, Р9-6880, Дубна, 1973.
2. R.Giannini, A.Susini. M-16, CERN, 1969.
3. R.Cohen, E.Martin, K.Ziegler. IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-18, No. 3, p. 326, 1971.
4. Ю.Г.Аленицкий, Н.Л.Заплатин, А.Ф.Чеснов. ОИЯИ, Р9-6241, Дубна, 1972.
5. Ю.Г.Аленицкий, Н.Л.Заплатин, А.Ф.Чеснов. Авторское свидетельство № 399087, Бюллетень изобретений №38, 1973.
6. С.Б.Ворожцов, В.П.Дмитриевский, Н.Л.Заплатин, Г.П.Лещенко, А.Ф.Чеснов. "Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц", т. II, стр. 99-103, Москва, 1973.
7. С.Б.Ворожцов, В.П.Дмитриевский, Н.Л.Заплатин, В.В.Кольга. ОИЯИ, Р9-7954, Дубна, 1974.
8. В.П.Дмитриевский, Н.Л.Заплатин, А.А.Кропин, В.С.Роганов, С.И.Чеснова. ОИЯИ, 9-7505, Дубна, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел 25 июня 1975 года.