

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2-51

УДК 621.384.633

9-87-925

ЧЕСНОВ

Александр Федорович

**СИСТЕМА ВЫВОДА ПУЧКА
ИЗ ФАЗОТРОНА ОИЯИ**

**Специальность: 01.04.20 - физика пучков
заряженных частиц и ускорительная техника**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Дубна 1987

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:
доктор технических наук Н.Л.Заплатин

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук Н.И.Веников
кандидат технических наук Г.А.Рябов

Ведущая организация: Институт ядерных исследований
АН УССР, Киев

Защита состоится " _____ " _____ 1988 г. в _____ часов
на заседании Специализированного совета Д-047.01.03 при Лаборатории
ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований,
г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1988 г.

Ученый секретарь Специализированного совета
доктор физико-математических наук Ю.А.Батусов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Программы экспериментальных исследований на сильноточных ускорителях протонов на энергию (0,5+1) ГэВ, выполнение которых позволило бы существенно продвинуть решение многих вопросов в области физики экспериментальных частиц, атомного ядра и прикладных исследований, требуют значительного увеличения интенсивности первичных и вторичных пучков частиц. Попытки путей повышения интенсивности привели к тому, что в начале 60-х годов стали разрабатываться проекты мезонных фабрик на базе линейных и циклических ускорителей.

Одной из работ этого направления является проект реконструкции синхротрона Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований в фазотрон с пространственной вариацией магнитного поля (фазотрон ОИЯИ). Основной целью реконструкции являлось увеличение тока внутреннего пучка с 2,3 мкА до 10+50 мкА и создание системы вывода, обеспечивающей повышение эффективности вывода с 5+7 до 50% и выше.

Реферлируемая диссертационная работа посвящена вопросам разработки и создания высокоэффективной системы вывода пучка фазотрона ОИЯИ и является обобщением работ, выполненных по этой проблеме в соответствии с проблемно-тематическим планом Объединенного института ядерных исследований.

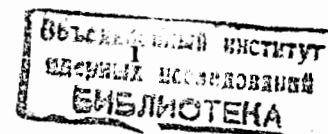
Цель работы состояла:

- 1) в выборе и оптимизации параметров системы возбуждения радиальных свободных колебаний (система заброса) на основе регенеративного метода, обеспечивающих максимальную эффективность заброса ускоренных частиц в отклоняющий канал с толщиной септума 0,4 см;
- 2) в расчете и формировании магнитных полей в элементах системы заброса и секциях железно-токового канала;
- 3) в формировании магнитного поля фазотрона с системой вывода пучка;
- 4) в получении выведенного пучка протонов с заданным коэффициентом вывода и исследовании его параметров.

Научная новизна работы заключается в разработке и реализации системы вывода пучка с эффективностью 50+70 % для фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля.

Решение этой проблемы включает в себя ряд частных решений, обладающих научной новизной, которые можно сформулировать следующим образом:

- предложен и создан железно-токовый канал, имеющий толщину септума, как у токового канала, но обеспечивающий в несколько раз большую



величину снижения магнитного поля при равной длине и потребляемой мощности;

- предложена и реализована новая система шиммирования возмущений магнитного поля от канала, которая позволила значительно сократить время по формированию магнитного поля фазотрона с системой вывода пучка;

- предложена и разработана аппаратура для диагностики пучка внутри отклоняющего канала на основе датчиков вторичной эмиссии.

Практическая ценность работы

1) Создана железно-токовая секция канала с толщиной септума 0,4 см, обеспечивающая величину снижения магнитного поля $0,45 \pm 0,47$ Тл в радиальной апертуре 1,8 см. При плотности тока в септуме 175 А/мм^2 потребляемая мощность равна 105 кВт.

2) В 1985 году осуществлен вывод протонного пучка с энергией 664 МэВ из фазотрона ОИЯИ в заданном направлении с расчетным коэффициентом вывода.

С 1986 года на фазотроне проводятся научные и прикладные исследования при токе выведенного пучка $\sim 2 \text{ мкА}$.

3) Расчетные и экспериментально-методические результаты работы могут быть использованы при создании систем вывода пучка из циклотронов и фазотронов, а также в других отраслях науки, применяющих технику формирования магнитных полей.

Апробация. Основные результаты диссертации докладывались на научных семинарах в ОИЯИ, на II-й Международной конференции по циклотронам и их применению (Токио, 1986 г.), на Всесоюзном совещании по ускорителям ионов низких и средних энергий (Киев, 1982 г.), на III, V, VIII, IX и X Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц (Москва, 1972 г.; Дубна, 1976, 1984, 1986 г.г.; Протвино, 1982).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ, получено авторское свидетельство на изобретение "Магнитный канал", которое внедрено на фазотроне ОИЯИ. Список литературы приведен в конце автореферата.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 150 страниц, включая 55 рисунков, 11 таблиц и список литературных ссылок из 80 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы постановка и актуальность задачи, цель, научная новизна и практическая ценность работы.

В I главе диссертации проводится анализ систем вывода пучка из циклических мезонных фабрик. Основными параметрами, определяющими выбор той или иной конкретной системы для данного ускорителя, являются эффективность вывода, эмиттансы и энергетический разброс частиц в выведенном пучке.

В циклических мезонных фабриках разделение орбит на конечном радиусе составляет от долей до нескольких миллиметров. В результате возникает необходимость в использовании физических механизмов, которые обеспечивают увеличение радиального шага частицы в зоне вывода, превышающего толщину септума отклоняющего канала.

Известные в настоящее время системы вывода пучка основаны либо на механизме увеличения разделения орбит, либо на возбуждении когерентных радиальных колебаний в зоне конечных радиусов ускорения.

Методы разделения орбит используются в циклотронах с большой глубиной вариации магнитного поля, имеющих секторную структуру магнитной системы. Эффективность вывода, равная 100% или с потерями на уровне $3 \cdot 10^{-4}$, достигается за счет: а) ускорения заряженных частиц с перезарядкой в зоне вывода (например, H^- -ионы); б) большого набора энергии за оборот (несколько мегаэлектронвольт); в) создания в области вывода требуемого градиента амплитуды основной гармоника магнитного поля, влияющего на коэффициент расширения орбит. Для практического использования данных методов требуется пучок с малым эмиттансом и низким энергетическим разбросом.

Возможность реализации эффективных резонансных методов вывода основана на использовании резонансной связи между азимутальным и радиальным движением заряженных частиц, возникающей вблизи значений частот свободных радиальных колебаний $Q_2 = 1; 3/2; 2$. Использование для вывода этих частот накладывает жесткие условия на выбор предельной энергии ускоряемых частиц в циклотронах.

При разработке проектов, основанных на реконструкции существующих синхrocиклотронов, резонансные условия для Q_2 в зоне вывода не всегда выполнимы, поэтому используются локальные искажения основного магнитного поля для получения соответствующего значения величины Q_2 . При резонансе исчезает прецессия, обусловленная нерезонансным значением частоты невозмущенного движения, и начинается резонансный режим воздействия магнитного поля неоднородностей на каждом обороте (либо через оборот при $Q_2 = 3/2$), в результате которого радиальные отклонения частиц от орбиты и, соответственно, разделение орбит возрастает по экспоненциальному закону. В переходной области магнитного поля неоднородностей, а также для нескольких оборотов в области рабочего градиента, в течение которых набирается необходимое разделение орбит,

аксиальное движение должно оставаться устойчивым и отгибающая аксиальных колебаний не должна превышать допустимых значений. Радиальный шаг орбиты за оборот пропорционален амплитуде колебаний на предшествующем обороте частицы, что при непрерывном спектре амплитуд в пучке не позволяет получить полного разделения эммитанса пучка. Это обстоятельство требует применения в системе вывода отклоняющих каналов с минимальной толщиной септума для получения максимальной эффективности вывода.

В фазотроне ОИЯИ используется регенеративный метод заброса частиц в отклоняющий канал, основанный на механизме параметрического резонанса. В данном методе с помощью одной или двух локальных неоднородностей градиента магнитного поля возбуждаются синхронные радиальные колебания частиц вблизи частоты $Q_2 = 1$. Для фазотрона, при использовании двух локальных неоднородностей (возбудитель и регенератор) с практически приемлемыми величинами градиента магнитного поля, необходимо, чтобы значение частоты радиальных колебаний в зоне вывода ($z = 260-270$ см) составляло $Q_2 = 1,07 \pm 1,09$, что накладывает определенные требования на закон изменения среднего магнитного поля ускорителя. Магнитное поле фазотрона в средней плоскости описывается функцией

$$B_z(z, \varphi) = \bar{B}_z(z) \left\{ 1 + \varepsilon_N(z) \sin[\beta_N(z) - N\varphi] \right\}, \quad (I)$$

где $\bar{B}_z(z)$ - среднее магнитное поле, $\varepsilon_N(z) = \frac{B_{zN}(z)}{\bar{B}_z(z)}$ и $\beta_N(z) = \frac{2z}{\lambda}$ - вариация и фаза основной N -й гармоники поля, N и λ - периодичность и радиальный шаг структуры поля.

Вариация магнитного поля, создаваемая четырьмя парами шимм, изогнутых по спирали Архимеда, обеспечивает аксиальную устойчивость в растущем по радиусу магнитном поле. Рост среднего магнитного поля от центра к предельному рабочему радиусу определяет диапазон изменения частоты ускоряющего напряжения и выбран из условия получения требуемой величины Q_2 в зоне вывода * в виде

$$\bar{B}_z(z) = B_0 \exp \left[0,359 \left(\frac{z}{z_K} \right)^2 + 0,83 \left(\frac{z}{z_K} \right)^6 - 2,381 \left(\frac{z}{z_K} \right)^8 + 1,5 \left(\frac{z}{z_K} \right)^9 - 0,025 \left(\frac{z}{z_K} \right)^{10} \right], \quad \text{где } B_0 = 1,1902 \text{ Тл, } z_K = 270 \text{ см.}$$

В фазотроне ОИЯИ для получения пучков вторичных частиц используются внешние мишени. Поэтому к системе вывода, наряду с высоким коэффициентом вывода, предъявляются дополнительные требования, которые

* Ю.Г.Аленицкий и др. ОИЯИ, Р9-5246, Дубна, 1970.

сводятся к получению выведенного пучка с малыми поперечными размерами и относительно низким энергетическим разбросом.

Для регенеративного метода заброса частиц в отклоняющий канал наиболее радикальным средством увеличения эффективности вывода является значительное уменьшение толщины септума входной секции отклоняющего канала. При этом появляется также возможность некоторого уменьшения величины заброса, что приводит к заметному уменьшению потерь частиц по аксиальному движению.

На этапе разработки системы вывода пучка из фазотрона были рассмотрены ферромагнитный и комбинированный отклоняющие каналы с толщиной септума на входе 3 см и 0,4 см соответственно. В результате анализа эффективности вывода и технических возможностей по созданию требуемых величин магнитного поля внутри канала в качестве основного был принят второй вариант отклоняющего канала с входной железно-токовой секцией, предложенной автором.

В таблице I приведены проектные параметры фазотрона ОИЯИ.

Таблица I. Параметры фазотрона ОИЯИ

Энергия ускоренных протонов	(МэВ)	680
Ток внутреннего пучка	(мкА)	10-50
Радиус конечной орбиты	(см)	270
Среднее магнитное поле на конечном радиусе	(Тл)	1,6276
Вариация магнитного поля на конечном радиусе		0,11
Параметр спирали Архимеда	(см)	15
Число дуантов		1
Амплитуда ускоряющего напряжения	(кВ)	30-50
Диапазон изменения частоты	(МГц)	18,18-14,41
Частота модуляции	(Гц)	200-500
Частоты бетатронных колебаний на конечном радиусе		$Q_2 = 1,07 \pm 1,09$ $Q_z = 0,3$

Во второй главе диссертации проведены исследования регенеративной системы вывода и выбор основных параметров элементов заброса пучка и секций железно-токового канала фазотрона ОИЯИ.

Система возбуждения радиальных колебаний состоит из двух локальных неоднородностей (возбудитель и регенератор) с противоположными по знаку градиентами магнитного поля. Предварительный выбор неоднородностей (величины градиентов магнитного поля, азимутальные и радиальные протяженности) основывался на анализе частот бетатронных колебаний *

* Дмитриевский В.П., Прилишко Т.М., Рыбалко В.С. ОИЯИ, Р9-3434-I, Дубна, 1967.

в магнитном поле (1), (2) :

$$\cos 2\pi Q = \cos 2\pi Q_0 - \frac{1}{2} [T_1 \Phi_0^2(\theta_1) + T_2 \Phi_0^2(\theta_2)] \cdot \sin 2\pi Q_0 + \frac{1}{2} T_1 T_2 \Phi_0^2(\theta_1) \Phi_0^2(\theta_2) \cdot \sin Q_0 \beta_1 \cdot \sin Q_0 (2\pi - \beta_1), \quad (3)$$

где $T_1 = \pm \Delta n_1 \alpha_1$, $T_2 = \pm \Delta n_2 \alpha_2$, $\Delta n_1, \Delta n_2$ - изменение показателя поля на орбите в области первой и второй неоднородностей, α_1, α_2 - азимутальная протяженность областей, θ_1, θ_2 - азимуты их расположения, $\beta_1 = \theta_2 - \theta_1 > 0$,

$$\Phi_0(\theta) \approx \frac{1}{\sqrt{Q_0}} \left[1 \pm \frac{E_N(R, \beta_N)}{N^2} \cos(\beta_N - N\theta) \right]. \quad (4)$$

В этих выражениях верхний знак относится к радиальному, нижний - к аксиальному движению, а Φ_0 и Q_0 - огибающая и частота соответствующего вида колебаний при отсутствии локальных неоднородностей.

Дальнейшая оптимизация параметров возбудителя и регенератора проводилась на основе численного моделирования процесса возбуждения радиальных колебаний с помощью программ CYCLOPS, MAXCOLA и SIMPZ^{ж)}. Равновесные орбиты частиц определялись по программе CYCLOPS и численно, путем нахождения двух сопряженных решений для линеаризованных уравнений свободных колебаний, определялись частоты и элементы матрицы оборота невозмущенного движения. Эти данные являлись исходными для программы MAXCOLA, в которой для каждого положения возбудителя (P) относительно фазы основной гармоники магнитного поля рассчитывались оптимальные положения регенератора (R) и значения сил P и R, соответствующие величине максимального разделения орбит на азимуте входа в отклоняющий канал при сохранении аксиальной устойчивости. Для выбранных параметров возбудителя и регенератора ($G_P = -0,031$ Тл/см; $G_R = 0,027$ Тл/см; $\alpha_1 = \alpha_2 = 5,7^\circ$; $\beta_1 = 62,5^\circ$) эффективность заброса для начальных энергий расщепки $E_H = 660$ МэВ и $E_H = 670$ МэВ ($A_2 = 0$), при равномерном распределении частиц по амплитудам свободных колебаний ($A_2 \leq 3$ см; $A_z \leq 1,3$ см), составила 53%. При анализе потерь пучка было замечено увеличение (в 1,5+2 раза) огибающих аксиальных колебаний на последних оборотах для $A_2 > 1,5$ см за счет приближения мгновенной частоты Q_z к резонансному значению $Q_z = 0,5$. Для понижения частоты Q_z была введена дополнительная неоднородность типа регенератор (R_d), расположенная за возбудителем, что позволило получить эффективность заброса 68%^{жж)}.

ж) Cohen R. et al. IEEE Trans. on Nucl. Sci. Ns-16, No 3, 1969, p.434.

жж) Воронцов С.Б. и др. ОИЯИ Р9-7954, Дубна, 1974.

Параметры отклоняющего канала были выбраны на основании расчета выводных траекторий по уравнениям движения и огибающих пучка с помощью матричного метода. За осевую траекторию канала принималась траектория частицы, расположенной в зоне максимальной плотности частиц в радиальном фазовом пространстве на входе в отклоняющий канал. Введение осевой траектории позволило отдельно рассматривать отклоняющие и фокусирующие свойства секций канала. С помощью созданных автором программ были выбраны величины снижения и градиенты магнитного поля, азимутальные протяженности, апертуры и радиусы кривизны секций отклоняющего канала. Критерием оптимальности выбора данных параметров являлось отклонение пучка в заданном направлении с минимальными потерями и получение минимальных поперечных размеров пучка на входе в систему транспортировки. При этом учитывалась практическая возможность получения требуемых магнитных полей в секциях канала.

Схема размещения элементов системы вывода пучка в камере фазотрона показана на рис.1, а их параметры приведены в табл.2.

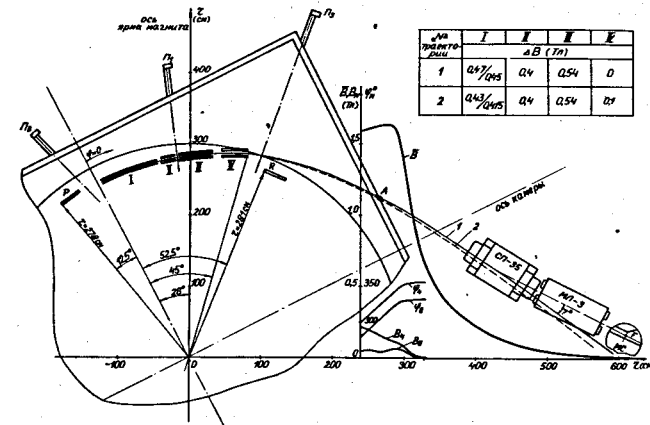


Рис.1. Схема размещения системы вывода пучка в камере фазотрона, головных элементов протонного тракта и характеристики магнитного поля (\bar{B} - среднее поле; B_4, B_8, Y_4, Y_8 - четвертая и восьмая гармоники поля и их фазы) в области расположения этих элементов. P - возбудитель, R - регенератор, I-IV - секции железно-токового канала, 1,2 - выводные траектории осевой частицы для величин снижения магнитного поля (ΔB) в секциях отклоняющего канала, приведенных в таблице.

Таблица 2. Параметры системы вывода

Элементы системы вывода	Азимут. протяженность (град.)	Апертура		Радиус кривизны (см)	ΔB (Тл)	$\frac{d\Delta B}{dz} \cdot 10^{-4}$ (Тл/см)
		$2a_z$ (см)	$2a_r$ (см)			
Возбудитель	5,7	-	-	-	-	-310
Регенератор	5,7	-	-	-	-	270
Дополнительный регенератор	3,0	-	-	-	-	350
Магнитный канал						
I железно-токовая	17,7	1,8	2,4	406,6	-0,47/-0,45	150/30
II ферромагнитная	4,5	2,2	2,4	422,0	-0,4	-100
III ферромагнитная	10,0	2,6	2,4	495,8	-0,54	-100
IV ферромагнитная	8,0	5,0	3,0	-	0	1000

Расчетные поперечные размеры пучка вдоль траектории и аксептанс канала приведены на рис.2. Величины отгибающих получены для моноэнергетического пучка протонов при транспортировке его в вакууме.

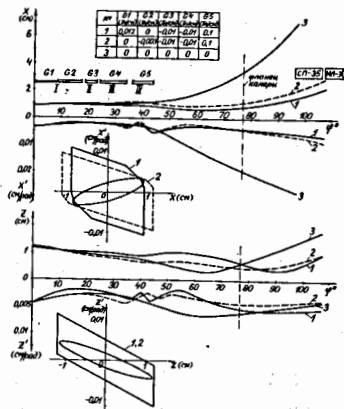


Рис.2. Отгибающие пучка для выводных траекторий I,2 (рис.1) и аксептансы отклоняющего канала. $G_1 - G_5$ - градиенты магнитного поля в секциях канала.

Разброс по энергии $\pm 3,2$ МэВ приводит к увеличению горизонтального размера пучка на выходе из камеры ускорителя в 1,6 раза. Таким образом, ожидаемый поперечный размер выведенного пучка будет равен $\sim (3\chi I) \text{ см}^2$, а потери в отклонящем канале составят (5+7)% от величины заброшенного.

В третьей главе диссертации рассмотрены вопросы формирования магнитного поля в элементах системы вывода, шиммирования возмущений магнитного поля фазотрона, обусловленных отклоняющим каналом, и экспериментальные результаты по выводу пучка из фазотрона ОИЯИ. Магнитные поля для ферромагнитных элементов системы вывода пучка (Р, R, R_d , II, III и IV секции канала) формируются с помощью железных пластин конечной длины, расположенных определенным образом относительно средней плоскости ускорителя. Основные и

шиммирующие пластины каждого элемента расположены в сильно неоднородном магнитном поле фазотрона по радиусу и азимуту. Расчеты магнитных полей (в диссертации дано описание программ, созданных автором) не позволяют с достаточной точностью выбрать геометрические размеры пластин, и они использовались как первое приближение. Окончательно магнитные поля в ферромагнитных элементах формировались на моделях и в рабочем зазоре магнита. В результате расчета и моделирования были получены характеристики магнитного поля (табл.2) в рабочих вертикальной и радиальной апертурах. Градиенты магнитного поля для Р и R ($G_p = -0,031$ Тл/см и $G_r = 0,027$ Тл/см) с точностью $\sim 2\%$ выполняются в интервале $\Delta z = 7,5$ см с величиной переходной зоны $\sim 3,5$ см. Возмущения магнитного поля в области циркулирующего пучка от II и III секций канала не превышают $30 \cdot 10^{-4}$ Тл, IV секция не вносит возмущений в зоне раскочки радиальных колебаний.

При выборе параметров токовых обмоток железно-токовой секции канала (ЖТС) были исследованы и решены проблемы, возникающие при создании септумных магнитов с высокой плотностью тока ($> 50 \text{ А/мм}^2$):

1. Выбрана оптимальная схема охлаждения септумной обмотки с учетом радиационного нагрева и максимальной плотности тока 175 А/мм^2 , позволяющая получить приблизительно однородное распределение магнитного поля в требуемой вертикальной апертуре и минимальные возмущения в области ускоряемого пучка.

2. Рассчитаны усилия на токовые и ферромагнитные элементы ЖТС и выбрана конструкция септума, обеспечивающая допустимые деформации под действием электромагнитных сил и температурных нагрузок.

3. Предложен способ и создана быстродействующая аппаратура для контроля температуры септума и охлаждающей воды.

4. Решен вопрос радиационно стойкой изоляции, выдерживающей тепловые деформации и знакопеременные нагрузки, обусловленные нестабильностью и пульсациями тока источника питания.

5. Решена проблема ввода в вакуумную камеру тока (12 кА) и охлаждающей воды с обеспечением требуемых регулировок радиального положения канала.

Расчеты магнитного поля в ЖТС проводились с учетом реального сечения и конфигурации токовых и ферромагнитных элементов. В результате была получена полная топография магнитного поля в зависимости от длины и при отходе от средней плоскости. На основании расчетных данных был изготовлен прямолинейный макет ЖТС в масштабе 1:1, на котором была измерена топография магнитного поля и определены возможности шиммирования за счет перераспределения токов в обмотках секции, проверена выбранная схема охлаждения и определены технические и эксплуатационные характеристики секции. Данные расчета и моделирования явились ос-

нованием для изготовления рабочего варианта ЖТС. ЖТС состоит из ферромагнитной пластины, септумной и корректирующей обмоток, рассчитанных на рабочий ток 11 кА и 3,1 кА соответственно. Септумная обмотка выполнена в виде двух независимо охлаждаемых витков, соединенных последовательно по току, в результате чего суммарный ток в септуме равен 22 кА. Толщина входной части септума составляет 0,4 см и увеличивается (по движению пучка) до 1,0 см, начиная с 40 см, при этом плотности тока соответственно равны 175 А/мм² и 55 А/мм². Септумные пластины набраны из медных трубок сечением 0,4x0,86 см и 1,0x1,0 см с отверстием для охлаждения 0,2x0,66 см и 0,56 см соответственно. Корректирующая обмотка выполнена в виде двух витков, симметрично расположенных относительно средней плоскости, и изготовлена из медной трубки сечением 1,0x1,0 см, с отверстием для охлаждения 0,56 см. В качестве изоляции используется окись алюминия (Al₂O₃), нанесенная методом плазменного напыления на деталях корпуса и септумных пластинах, микалента и стеклоткань.

Питание обмоток ЖТС осуществляется от стандартных выпрямительных агрегатов с номинальными токами и напряжениями, соответственно равными: I_н=12,5 кА, U_н=12 В - для септумной и I_н=3,4 кА, U_н=12 В - для корректирующей обмоток. Выпрямители снабжены стабилизаторами, выполненными на базе магнитных компараторов, обеспечивающими стабильность тока на уровне 10⁻³. Силовая часть выпрямителей смонтирована на верхней балке яра магнита ускорителя, а стойки управления и стабилизации расположены на расстоянии ~200 м от ускорителя. Ток к обмоткам ЖТС подводится с помощью алюминиевых водоохлаждаемых шинопроводов, медных гибких переходов и коаксиальных тоководов. При рабочих токах в обмотках секции температура воды на выходе из коаксиалов составляет 57° С для септумной и 52° С для корректирующей, при входной температуре воды 20° С и давлении 5 кг/см². Падение напряжения и потребляемая мощность в обмотках ЖТС (U₁, P₁), коаксиальных (U₂, P₂) и гибких (U₃, P₃) токопроводах, а также суммарные величины приведены в табл.3.

Таблица 3. Электрические характеристики железно-токовой секции

I	U ₁	P ₁	U ₂	P ₂	U ₃	P ₃	ΣU	ΣP
(А)	(В)	(кВт)	(В)	(кВт)	(В)	(кВт)	(В)	(кВт)
Септумная 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

При рабочих токах в обмотках секции были получены требуемые магни-

тные поля в апертуре ЖТС (табл.2). Общий вид системы вывода пучка в камере ускорителя показан на рис.3.



Рис.3. Система вывода пучка фазотрона ОИЯИ.

Для шиммирования возмущений магнитного поля фазотрона, обусловленных железно-токовым каналом, предложена и разработана новая система шиммирующих элементов (рис.4), расположенных над плакировкой ускорительной камеры.

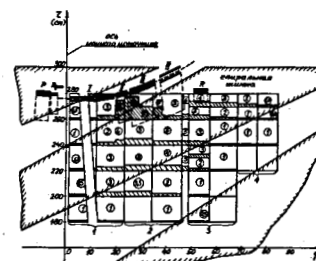


Рис.4. Схема размещения системы вывода пучка и шиммирующих элементов в камере фазотрона. P - возбудитель, R_{доп.} - дополнительный регенератор, R - регенератор, I - IV - секции канала, I-4 - дирамминиевые пластины для крепления секторных шимм, (I) - толщина в мм секторных шимм.

Это позволило значительно сократить время по формированию магнитного поля фазотрона с отклоняющим каналом. Магнитные поля возбудителя и регенератора, полученные в результате расчета и моделирования на стенде, не потребовали дополнительного шиммирования в поле фазотрона. Характеристики магнитного поля фазотрона с системой вывода (рис.5,6) обеспечивают ускорение протонов до конечного радиуса и удовлетворяют требованиям регенеративного метода заброса частиц в отклоняющий канал.

Точность измерения аксиальной компоненты магнитного поля составляла $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ Тл.

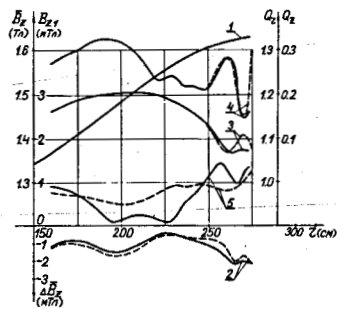


Рис.5. Характеристики магнитного поля фазотрона на конечных радиусах. 1 - B_z троб., 2 - ΔB_z , 3 - Q_z , 4 - Q_z , 5 - B_{z1} . — — без системы вывода, — — с отклоняющим каналом и секторными шиммами рис.4.

Проведенные численные расчеты эмиттанса и энергетического распределения пучка на входе в канал для сформированного магнитного поля фазотрона показали, что ожидаемая энергия выведенного пучка будет равна $(664 \pm 3,2)$ МэВ, а эффективные радиальный и аксиальный эмиттансы $\varepsilon_z = \varepsilon_z \approx 2,0$ п.см мрад.

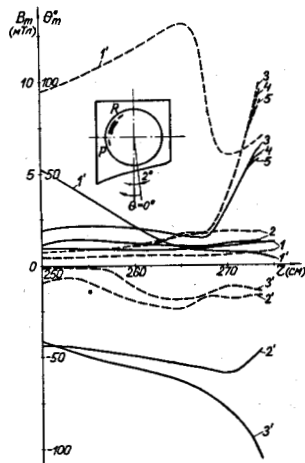


Рис.6. Амплитуды и фазы первой (сплошные линии) и второй (пунктир) гармоник магнитного поля в зоне вывода. 1, 1' - без системы вывода, 2, 2' - с отклоняющим каналом, 3, 3' - с системой вывода (возбудитель и регенератор в рабочем положении), 4 - с системой вывода (поставлен дополнительный регенератор), 5 - элементы системы вывода как в 4, но магнитное поле измерено для $z = 0,5$ см.

Экспериментальные исследования системы вывода были проведены в два этапа. В период физического пуска (1984 г.) для сформированного магнитного поля фазотрона без отклоняющего канала и дополнительного регенератора (рис.5, пунктирные линии) была исследована система заброса пучка. В результате исследований были определены:

- величина заброса пучка на входе в отклоняющий канал, при расчетном расположении возбудителя и регенератора;
- зависимости величины заброса от радиального положения P и R ;
- распределение плотности заряда по величине заброса;

г) аксиальный размер пучка и его положение относительно средней плоскости ускорителя. Было показано (рис.7), что на основе регенеративного метода возбуждения радиальных колебаний обеспечивается необходимая величина заброса пучка на входе отклоняющего канала ($\Delta z_{max} = 2,6$ см) при сохранении аксиального размера ($\Delta z_{max} \approx 1,0$ см) и приблизительно равномерного распределения плотности заряда по величине заброса.

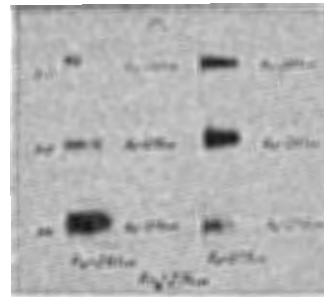
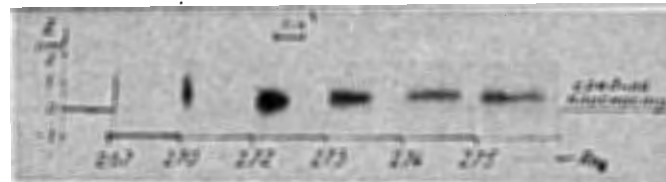


Рис.7. Автографы пучка при изменении радиального положения возбудителя (R_p) и регенератора (R_R) и в области раскочки радиальных колебаний при расчетном положении возбудителя и регенератора. $z = 0$ - средняя плоскость ускорителя, $R_{пв}$ - радиус пробника на входе в канал.



Пучок выведенных протонов был получен в апреле 1985 года. Траектория выведенного пучка с точностью ~ 1 см совпала с расчетной на входе в отклоняющий магнит СП-35 (рис.1, кривая 1). Экспериментальные исследования системы вывода проводились без $R_{доп.}$ при амплитудах ускоряющего напряжения на частотах захвата ($f = 18,18$ МГц) и вывода ($f = 14,4$ МГц), соответственно равных 32 кВ и 25 кВ.

Для диагностики пучка использовались следующие методы:

- До радиуса 1 м (энергия протонов ≤ 70 МэВ) ток пучка измерялся трехламельным пробником, что давало также информации об аксиальном положении пучка относительно средней плоскости.
- Наличие ускоренного пучка на радиусах $> 0,5$ м определялось с помощью сцинтилляционного детектора по гамма- и нейтронному излучению, образуемому при взаимодействии пучка с мишенью пробника.
- Измерения интенсивности внутреннего пучка на радиусах $R = 107,5, 145, 183, 222,5, 262$ см проводились с помощью индукционных датчиков дифференцирующего типа (пикап-электродов). Точность измерения тока пучка составляла $\sim 10\%$.

4. Интенсивность и распределение плотности заряда протонного пучка на входе и вдоль длины отклоняющего канала определялись активационным методом, а на выходе из ускорительной камеры – активационным и калориметрическими методами. Точность измерения для данных методов составляет ~10%.

5. Радиальное и аксиальное положения пучка, по отношению к апертурам секций отклоняющего канала, определялись с помощью многоламельных и дифференциальных датчиков вторичной эмиссии, разработанных автором.

6. С помощью автографов на стекле определялись отклонения от средней плоскости, аксиальный размер, величина заброса и поперечный размер выведенного пучка.

На рис.8 показаны автографы пучка вдоль выводной траектории, полученные в точках П_В, П_Г, П_З, А и на входе в СП-35 (рис.1, траектория I)

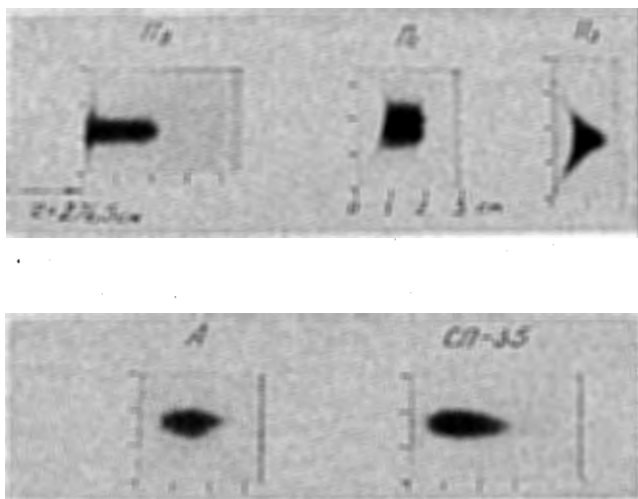


Рис.8. Автографы пучка вдоль выводной траектории I (рис.1).

Пучок хорошо сфокусирован вдоль длины канала и его поперечные размеры с точностью 10% согласуются с результатами расчета (рис.2, кривые I). Так как радиальные апертуры секций канала (табл.2) больше соответствующих поперечных размеров пучка, то имеется возможность для согласования траектории выведенного пучка с оптической осью протонного тракта

без потери интенсивности внутри отклоняющего канала. Экспериментально было определено, что при развороте канала относительно входа на $\pm 0,1$ см выведенный пучок смещается на входе в СП-35 на $\pm 0,7$ см.

Измерения интенсивности пучка активационным методом показали, что коэффициент вывода составляет $50 \div 70$ %, а потери внутри отклоняющего канала не превышают 10%. Эффективность вывода, измеренная с помощью индукционных датчиков ($R = 262$ см) и калориметра, составила ~60%, при токе выведенного пучка ~2 мкА.

Величины горизонтального и аксиального эмиттансов пучка были измерены методом поперечных сечений^{*)}. Профили выведенного пучка измерялись в трех точках за мишенной станцией (МС) при включенном магните СП-35 (рис.1). Для расчета эмиттансов использовались размеры профилей пучка на уровне 0,9, что соответствует приблизительно 95% частиц. Полученные значения эффективных эмиттансов в точке фокуса (точка F, рис.1) соответственно равны $\epsilon_x = (6,9 \pm 1,4) \pi$ см·мрад и $\epsilon_z = (3,3 \pm 0,8) \pi$ см·мрад. Расчетные значения эффективных эмиттансов в этой точке, с учетом разброса по энергии $\pm 3,2$ МэВ, имеют величины $\epsilon_x = 4,35 \pi$ см·мрад и $\epsilon_z = 2,0 \pi$ см·мрад. В расчете не учитывалось действие на пучок выпускной диафрагмы и ионизационной камеры, имеющих общую толщину ~500 мкм (алюминий) и участка воздуха длиной ~5 м. Наличие локальных и протяженных рассеивателей существенно влияет на размеры эмиттансов пучка^{ж)}, причем величина воздействия сильно зависит от исходных размеров. Учитывая, что на фазотроне проводятся работы по оптимизации параметров работающих систем и вводу новых, которые влияют на параметры выведенного пучка, окончательные величины эмиттансов будут уточняться.

В 1986 году максимальная интенсивность внутреннего пучка фазотрона доведена до 7 мкА, ускоренный пучок выведен из камеры ускорителя с эффективностью ≥ 50 %. Интенсивность выведенного пучка при обычной работе составляет ~2 мкА. Система вывода работает устойчиво и не требует подстройки при повторных включениях ускорителя. В табл.4 приведено сравнение расчетных и экспериментальных параметров выведенного пучка фазотрона ОИЯИ.

В конце главы рассмотрена возможность увеличения эффективности регенеративной системы вывода пучка из фазотрона ОИЯИ при использовании в системе вывода электростатического дефлектора с толщиной септума 0,1 см.

*) В.М.Абазов и др. ОИЯИ, 9-87-322, Дубна, 1987.

ж) Н.К.Абросимов, М.С.Перский, Г.А.Рябов. В сб.: Труды IX Всесоюзного сов. по ускор. заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1985, т. I, с.352.

Таблица 4. Параметры выведенного протонного пучка из фазотрона ОИЯИ

Параметры пучка	Экспериментальные	Расчетные
Энергия, МэВ	659 ± 6	664
Энергетический разброс, МэВ	$3,1 \pm 0,8$	3,2
Интенсивность, р/с	$\sim 2,4 \cdot 10^{13}$	-
Плотность интенсивности на выходе из камеры ускорителя, р/см ² ·с	$\sim 0,8 \cdot 10^{13}$	-
Эффективность вывода, %	50 - 70	53-68
Эффективные эмиттансы в точке фокуса для 95% пучка, см·мрад	$\epsilon_x = (6,9 \pm 1,4) \pi$ $\epsilon_z = (3,3 \pm 0,8) \pi$	$\epsilon_x = 4,35 \pi$ $\epsilon_z = 2,0 \pi$

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Впервые осуществлен вывод ускоренного пучка протонов с эффективностью 50-70 % для фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля. Максимальная интенсивность выведенного пучка протонов составляла $\sim 3,8$ мкА, с плотностью интенсивности $0,8 \cdot 10^{13}$ р/см²·с на выходе из камеры ускорителя. При обычной работе ток пучка равен ~ 2 мкА.

2. Предложен и создан новый тип отклоняющего канала с толщиной септума 0,4 см и плотностью тока 175 А/мм², имеющий в несколько раз большую величину снижения магнитного поля по сравнению с токовым при равной длине, толщине септума и потребляемой мощности. Использование этого канала в системе вывода пучка из фазотрона ОИЯИ позволило получить максимальный коэффициент вывода для данного класса ускорителей в СССР, что соответствует уровню, достигнутому в мировой практике. Данный тип канала может быть использован в системе вывода пучка из циклотронов с регулируемой энергией.

3. Проведен выбор и оптимизация параметров элементов системы вывода, обеспечивающих максимальную эффективность заброса и отклонения пучка протонов с энергией 664 МэВ в заданном направлении с минимальными потерями в канале и малым поперечным размером $\sim 3 \times 1$ см на выходе из камеры ускорителя.

4. Сформированы требуемые магнитные поля в элементах системы вывода. Предложена и разработана новая система шиммирующих элементов для формирования магнитного поля фазотрона в зоне вывода, что позволило значительно сократить время по шиммированию возмущений магнитного поля, обусловленных железно-токовым каналом.

5. Разработаны вторично-эмиссионные датчики, позволяющие измерять радиальное и аксиальное положение пучка внутри отклоняющего канала. Использование данных средств диагностики позволяет осуществлять непрерывный оперативный контроль радиального положения пучка по отношению к апертурам канала.

6. Рассмотрен путь дальнейшего увеличения эффективности регенеративной системы вывода пучка из фазотрона ОИЯИ за счет использования электростатического дефлектора с толщиной септума 0,1 см.

Содержание диссертации отражено в следующих основных работах:

1. Аленицкий Ю.Г., Заплатин Н.Л., Чеснов А.Ф. О возможности использования железно-токового канала в системе вывода пучка из изохронного циклотрона У-120М. - В кн.: Материалы II рабочего совещания по изохронному циклотрону У-120М. - Дубна, 1972, с.123-130. (Препринт / Объед. ин-т ядерн. исследований.: Р9-6241).
2. А.с. СССР №399087 с приоритетом от 1971 г. "Магнитный канал". Аленицкий Ю.Г., Заплатин Н.Л., Чеснов А.Ф. Бюллетень ОИПОТЗ №38, 1973, с.175.
3. Ахманов В.В., Заплатин Н.Л., Чеснов А.Ф. Электромагнитная секция канала в системе вывода пучка из изохронного циклотрона. - Дубна, 1974. - II с. (Сообщение / Объед. ин-т ядерн. исследований.: Р9-10306).
4. Ворожцов С.Б.,..., Чеснов А.Ф. Система вывода частиц из фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля с использованием железно-токового канала. - В кн.: Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. - М., Наука, 1973, т.2, с.99-103.
5. Дмитриевский В.П.,..., Чеснов А.Ф. Система вывода пучка из фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля при использовании ферромагнитного канала. - Дубна, 1973. - I6 с. (Сообщение / Объед. ин-т ядерн. исследований.: Р9-6880).
6. Заплатин Н.Л., Самсонов Е.В., Чеснов А.Ф. Выбор параметров элементов системы вывода пучка из фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля при использовании железно-токового канала. - Дубна, 1975. - 23 с. (Сообщение / Объед. ин-т ядерн. исследований.: Р9-9023).
7. Василенко А.Т.,..., Чеснов А.Ф. Исследование железно-токового канала для фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля. - Дубна, 1975. - I4 с. (Сообщение / Объед. ин-т ядерн. исследований.: Р9-9119).
8. Василенко А.Т.,..., Чеснов А.Ф. Железно-токовая секция канала фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля (Установка "Ф"). - В кн.: Труды V Всесоюзного совещания по ускорителям

заряженных частиц. - М., Наука, 1977, т.1, с.158-161.

9. Василенко А.Т.,..., Чеснов А.Ф. Железно-токовый канал для фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля. - Дубна, 1979. - 16 с. (Сообщение / Объед. ин-т ядерн. исследований.: Р9-12586).
 10. Заплатин Н.Л., Калининченко В.В., Чеснов А.Ф. Система вывода пучка из фазотрона ОИЯИ. - В кн.: Труды Всесоюзного совещания по ускорителям ионов низких и средних энергий. - Киев, Наукова думка, 1982, с.85-89.
 11. Заплатин Н.Л., Ивашкевич С.А., Чеснов А.Ф. и др. Формирование магнитного поля фазотрона ОИЯИ в зоне вывода. - В кн.: Труды УШ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. - Дубна, ОИЯИ, 1983, т.2, с.87-89.
 12. Аленицкий Ю.Г.,..., Чеснов А.Ф. и др. Фазотрон ОИЯИ - физический пуск. - В кн.: Труды IX совещания по ускорителям заряженных частиц. - Дубна, ОИЯИ, 1985, т.1, с.289-298.
 13. Заплатин Н.Л., Ивашкевич С.А., Чеснов А.Ф. и др. Формирование магнитного поля фазотрона ОИЯИ с системой вывода пучка. - Дубна, 1985. - 7 с. (Сообщение / Объед. ин-т ядерн. исследований.:Р9-85-258).
 14. Воронцов С.Б.,..., Чеснов А.Ф. Предварительные исследования регенеративной системы заброса пучка фазотрона ОИЯИ. - В кн.: Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц.-Дубна, ОИЯИ, 1985, т.1, с.316-319.
 15. Аленицкий Ю.Г.,..., Чеснов А.Ф. и др. Электростатическая система вывода пучка из фазотрона ОИЯИ. - В кн.: Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. - Дубна, ОИЯИ, 1985, т.1, с.324-329.
 16. Дмитриевский В.П.,..., Чеснов А.Ф. и др. Вывод протонного пучка из фазотрона ОИЯИ. - В кн.: Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. - Дубна, 1987, т.П, с.237-241.
 17. Василенко А.Т.,..., Чеснов А.Ф. и др. Фазотрон ОИЯИ. Результаты наладки. - В кн.: Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. -ОИЯИ, Д9-87-105, Дубна, 1987, т.П, с.228-232.
 18. Денисов Ю.Н.,..., Чеснов А.Ф. и др. Устройства диагностики пучка фазотрона. - В кн.: Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. - ОИЯИ, Д9-87-105, Дубна, 1987, т.1, с.56-60.
- In: Proc. of the 11-th Int. Conf. on Cycl. and their Applications. - Tokyo, 1987, p.461.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 декабря 1987 года.