

Объединенный
институт
ядерных
исследований
Дубна

P9-85-358

В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский, Л.М.Онищенко

ФИЗИЧЕСКИЙ ПУСК ФАЗОТРОНА ОИЯИ

Направлено на Международное совещание
по циклотронам /Бехине, ЧССР, 1985 г./

1985

Фазотрон Объединенного института ядерных исследований^{/1/} рассчитан на ускорение протонов до энергии 680 МэВ при токе внутреннего пучка 10-50 мкА. Основной особенностью этого ускорителя является пространственная вариация магнитного поля, обеспечивающая аксиальную устойчивость ускоряемых частиц в растущем по радиусу магнитном поле. Это позволяет существенно /более чем вдвое/ сократить диапазон перестройки частоты ускоряющего электрического поля и увеличить ускоряющее напряжение до 50 кВ и частоту циклов до 500 Гц.

Другой важной особенностью фазотрона ОИЯИ является применение в системе вывода пучка из камеры ускорителя в качестве первой секции выводного канала электромагнитной секции с толщиной септума 4 мм, что должно обеспечить эффективность вывода пучка из камеры ускорителя более 60%. Поэтому в физических экспериментах планируется использовать только выведенный пучок.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

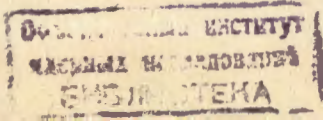
Магнитное поле^{/2/} ускорителя в медианной плоскости описывается выражением

$$B_z(r, \phi) = \bar{B}_z(r) + B_N(r) \cos\left(\frac{r}{\lambda} - N\phi\right), \quad N = 4, \quad \lambda = 15 \quad /1/$$

$$\bar{B}_z(r) = B_0 \exp\left[0,359\left(\frac{r}{r_k}\right)^2 + 0,83\left(\frac{r}{r_k}\right)^6 - 2,351\left(\frac{r}{r_k}\right)^8 + 1,5\left(\frac{r}{r_k}\right)^9 - 0,025\left(\frac{r}{r_k}\right)^{10}\right]$$

$$r_k = 270 \text{ см}; \quad B_0 = 11902 \text{ Гс.} \quad /2/$$

Первый член в /1/ задает закон изменения /роста/ среднего магнитного поля вдоль радиуса, второй - периодическое изменение /вариацию/ магнитного поля в плоскости (r, ϕ) . Представление о конструкции магнитной системы дают рис.1-3. Зависимость сформированного магнитного поля от радиуса показана на рис.4. Отклонение $B_z(r)$ от заданного выражением /2/ не превышает 20 Гс. Среднее магнитное поле, как видно, растет во всей зоне радиусов, кроме центра, что должно обеспечить уменьшение радиального размера сепаратрисы в соответствии с затуханием радиально-фазовых колебаний при примерно постоянном косинусе равновесной фазы. На рис.5 показаны частоты поперечных колебаний. Видно, что поперечная устойчивость обеспечивается во всей зоне ускорения^{/3/}.



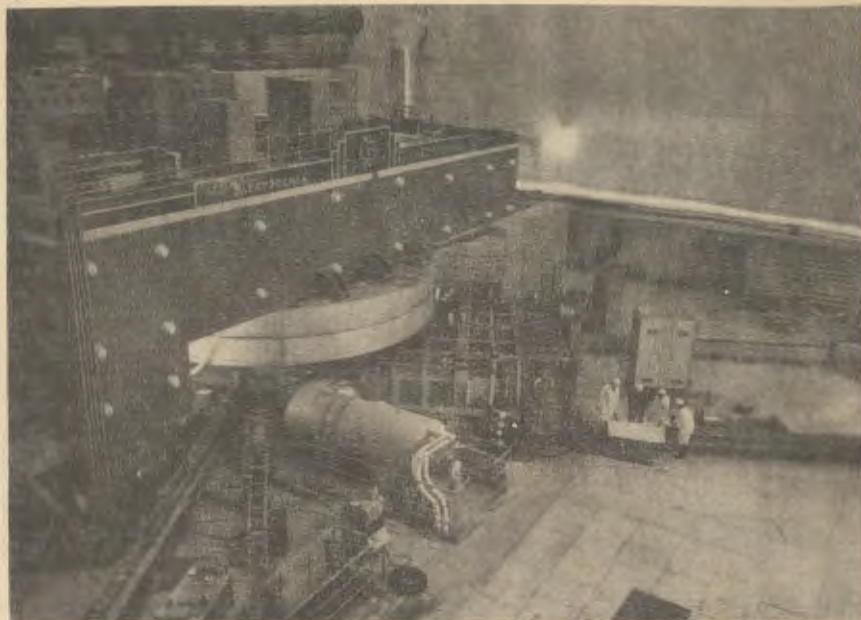


Рис.1. Общий вид ускорителя.

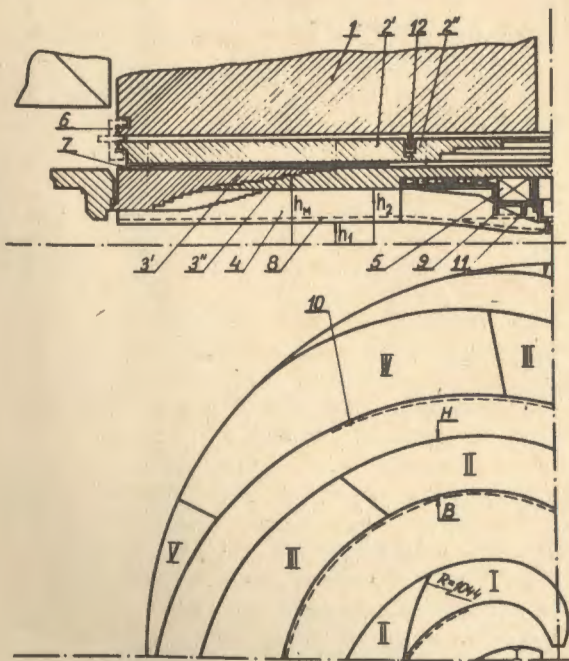


Рис.2. Схема магнитной системы. 1 - полюс; 2 - наружный диск крышки камеры; 3 - внутренний диск; 4 - спиральные шиммы; 5 - концентрические катушки; 6 - наружное расклинивающее устройство; 7 - секторные шиммы; 8 - шиммы-стержни; 9 - гармоническая катушка; 10 - боковые накладки; 11 - центральная вставка; 12 - внутреннее расклинивающее устройство.

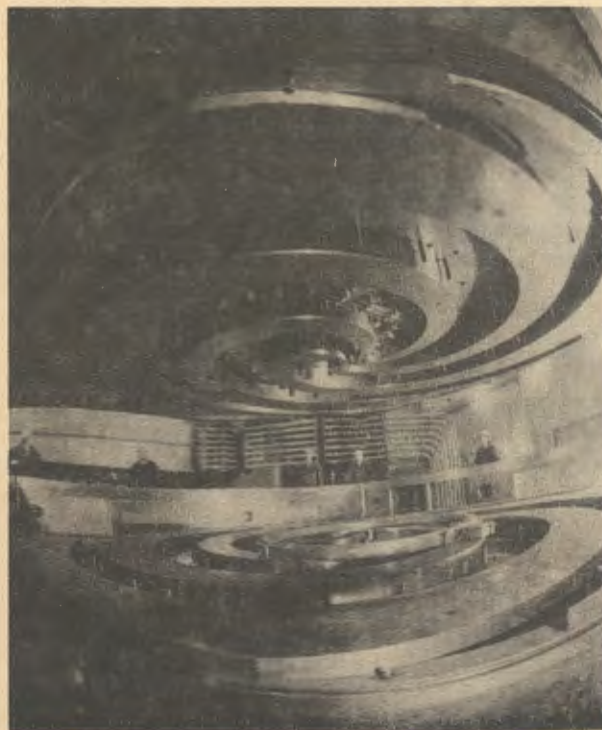


Рис.3. Полюсные диски.

Величины низших гармоник вертикальной компоненты поля представлены на рис.6. Чтобы обеспечить хорошее радиальное качество пучка, амплитуда первой гармоники в центральной зоне /до радиуса 50 мм/ отшумирована до $2 \div 3$ Гс; на остальных радиусах она не превышает 10 Гс. Важным вопросом для фазотрона является отсутствие в центральной зоне ускорителя аксиальной устойчивости, что связано с растущим по радиусу средним значением магнитного поля при малых значениях вариации.

В циклотронах этот недостаток компенсируется большой величиной ускоряющего напряжения, которая позволяет за несколько первых оборотов ввести ионы в зону с аксиальной магнитной фокусировкой, а также эффективно использовать электрическую фокусировку.

В фазотроне увеличение амплитуды ускоряющего напряжения ограничивается электрической прочностью вариатора частоты, а фазовое движение ионов, определяемое эффектом автофазировки,

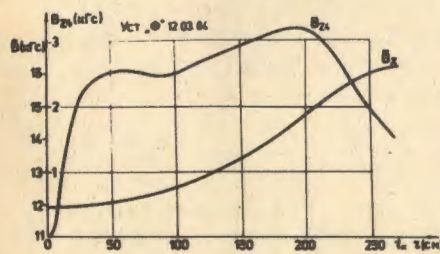


Рис.4. Зависимости $\bar{B}(r)$ и $B_N(r)$.

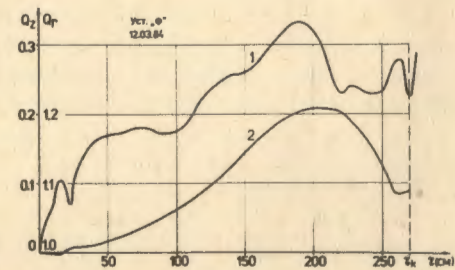


Рис.5. Зависимость частот поперечных колебаний от радиуса 1 - Q_z , 2 - Q_r .

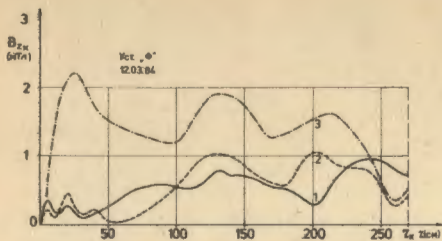


Рис.6. Низшие гармоники магнитного поля.

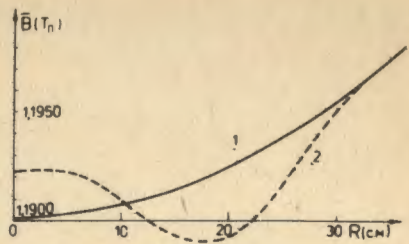


Рис.7. Магнитное поле в центральной области. 1 - расчетное поле; 2 - поле с бампом.

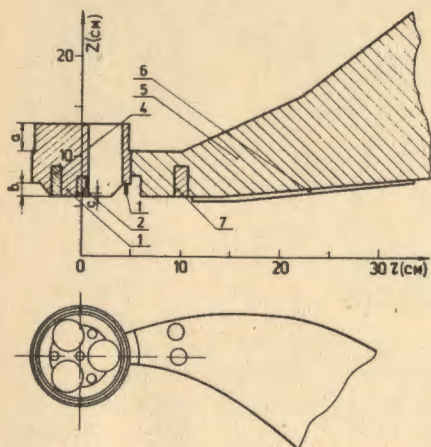
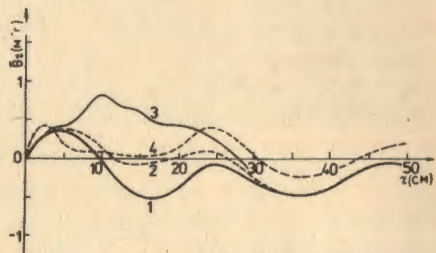


Рис.8. Схема магнитной системы центральной области ускорителя.

Рис.9. Радиальная компонента магнитного поля.



значительно увеличивает /с учетом возврата частиц к центру/ как фазовую скорость, так и диапазон фаз уже на первом фазовом колебании, что затрудняет использование электрической фокусировки.

Недостаточность /отсутствие/ аксиальной фокусировки в центре фазотрона накладывает жесткий допуск на нарушение зеркальной симметрии магнитного поля относительно средней геометрической плоскости $\bar{B}_r \sim 0,5 \pm 1$ Гс/. Комплексное опробование систем ускорителя в 1983 г. показало, что шиммирование магнитного поля в этих допусках требует очень больших усилий. Это потребовало пересмотра теоретических концепций в области первого фазового колебания. В результате численных расчетов^{/4/} был найден /а затем экспериментально проверен/ закон изменения среднего магнитного поля вдоль радиуса /рис.7/, позволяющий реализовать фазотронный режим ускорения с меньшей /чем проектная/ амплитудой ускоряющего напряжения /25±35 кВ/ при существенном увеличении допуска на нарушение зеркальности магнитного поля

$\bar{B}_r \sim 3 \div 5$ Гс/. Новизна режима заключается в отходе от классической схемы автофазировки, предполагающей постоянство или медленное изменение параметров за время фазового колебания и отсутствие перехода через критическую энергию.

В найденном режиме ускорения пучок дважды переходит критическую энергию за время первого фазового колебания, однако быстрое прохождение этих зон не вызывает существенных фазовых потерь.

Несмотря на то, что "бамповый" режим магнитного поля позволяет существенно ослабить допуск на радиальную компоненту магнитного поля, вопросу ее шиммирования пришлось уделить много времени и сил как в период подготовки к физическому пуску, так и в послепусковой период. Повторное формирование магнитного поля после физического пуска было вызвано, с одной стороны, необходимостью отшиммировать возмущения, вносимые в магнитное поле системой вывода пучка, с другой - подготовкой к работе с вертикальным ионным источником. Геометрия нового центра магнитной системы, обеспечивающего ввод и регулировку положения вертикального ионного источника, показана на рис.8. Величины радиальной компоненты поля представлены на рис.9. Кривая 1 показывает распределение радиальной компоненты от ферромагнитных элементов ускорителя для пускового варианта поля. Для уменьшения потерь пучка по вертикали в центральной зоне потребовалось включить корректирующую обмотку, расположенную на радиусе 17,5 см. При этом распределение радиальной компоненты приобрело вид, показанный кривой 2. Кривая 3 характеризует радиальную компоненту для нового центра до шиммирования, а кривая 4 - после шиммирования.

УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА

Зависимость $\bar{B}(r)$ и перепад значений среднего магнитного поля от центра $\bar{B}(0) \approx 11,9$ кГс до конечного радиуса $\bar{B}(r_k) = 16,3$ кГс в фазотроне определяют требования к диапазону частот и зависимости частоты ускоряющего напряжения от времени. Важнейшей характеристикой высокочастотной системы является также зависимость от времени амплитуды ускоряющего напряжения.

Ускоряющая система^{/5/} фазотрона включает в себя резонансную линию, образованную дуантом в вакуумной камере ускорителя /рис.10/ и вариатором частоты /рис.11/, и высокочастотный автогенератор. Требуемый диапазон частот ускоряющего напряжения заключен в пределах 18,2±14,4 МГц, максимальная скорость вращения вариатора составляет 3600 об/мин при относительной точности стабилизации $2 \cdot 10^{-4}$, амплитуда ВЧ-напряжения 30-50 кВ, причем нижний предел необходим для физического пучка, а верхний - для достижения проектной интенсивности пучка. Схема ВЧ-системы показана на рис.12. Плоская полуволновая однород-

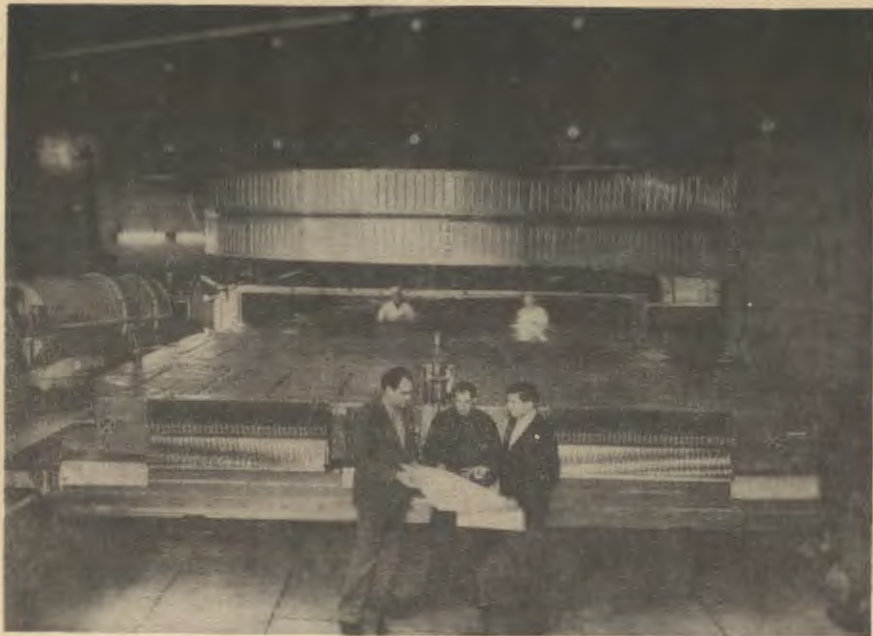


Рис.10. Дуант.



Рис.11. Вариатор частоты.

ная линия, образованная системой дуант - камера, имеет длину 7,3 м, ширину 6 м и постоянный зазор 78,5 мм /волновое сопротивление 2,5 Ом/. Ее резонансная частота перестраивается с помощью двух идентичных емкостных вариаторов. Каждый вариатор состоит из ротора, ось которого параллельна кромке дуанта; статора, механически и электрически соединенного с дуантом, и коллектора. Ротор образован 59-ю дисками, несущими /каждый/ 10 семиградусных лопаток. Зазор между роторными лопатками и статорными пластинами меняется от 7 мм /на верхней частоте диапазона/ до 4 мм /на нижней/; при этом емкость вариатора изменяется от 500 до 3000 пФ. Коллекторный конденсатор емкостью около 32000 пФ, образованный 284-градусными коллекторными пластинами и входящими в них с зазором 1,5 мм роторными лопатками, заземляет ротор по высокой частоте. При этом напряжение на валу ротора не превышает 4% от ускоряющего напряжения.

В результате наладки ВЧ-системы /6/ был получен требуемый диапазон частот с некоторым запасом, и получена зависимость частоты от времени, обеспечивающая в сформированном магнитном поле величину косинуса равновесной фазы в пределах $0,3 \pm 0,4$ /рис.13/. Полученная зависимость амплитуды ускоряющего напряжения от времени /рис.14/ обеспечивает ускорение пучка без фазовых потерь при напряжении на частоте захвата 30 кВ. Достигнута также проектная скорость вращения вариатора. Здесь нужно отметить, что во время физического пуска большая часть экспериментов по наладке ВЧ-системы, а затем по ускорению пучка, проводилась при скважности 10, т.е. при частоте модуляции ВЧ-генератора в 10 раз более низкой, чем частота модуляции резонансной системы.

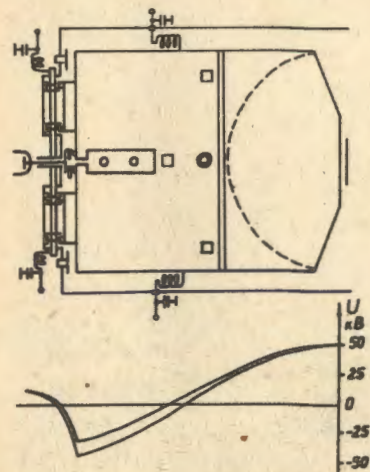


Рис.12. Схема высокочастотной системы и распределение напряжения вдоль резонансной линии.

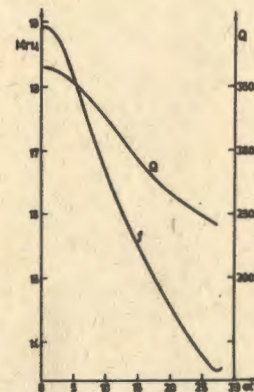


Рис.13. Зависимость от времени /угла поворота/ частоты и добротности резонансной системы.

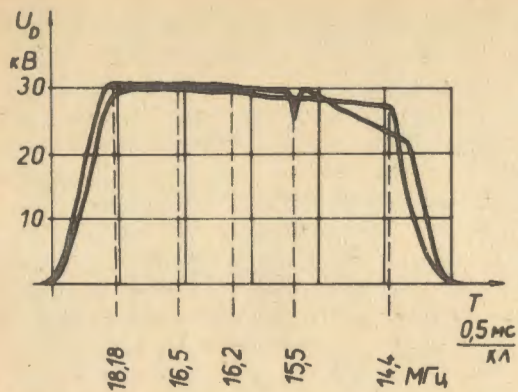


Рис.14. Зависимость амплитуды ускоряющего напряжения от времени.

Усовершенствование вакуумной системы /введение азотохлаждаемых ловушек с азотопроводом/ позволило получить устойчивый вакуум в камере величиной $2 \cdot 10^{-8}$ мм рт.ст., $1.5 \cdot 10^{-8}$ мм рт.ст. при работе ионного источника/,

обеспечивающий необходимую электрическую прочность ВЧ-системы при достигнутых уровнях ускоряющего напряжения.

ИОННЫЙ ИСТОЧНИК И ГЕОМЕТРИЯ ЦЕНТРА

Для генерации протонов используется ионный источник горизонтального ввода /рис.15/ пеннинговского типа с накалимым катодом. Типичный режим работы ИИ: ток накала нити 200-150 А, ток разряда /дуги/ - 1 А, расход газа - $1,5 \pm 2$ см³/мин.

Головка ионного источника расположена на оси камеры, параллельной кромке дуанта, и смещена от центра примерно на 20 мм

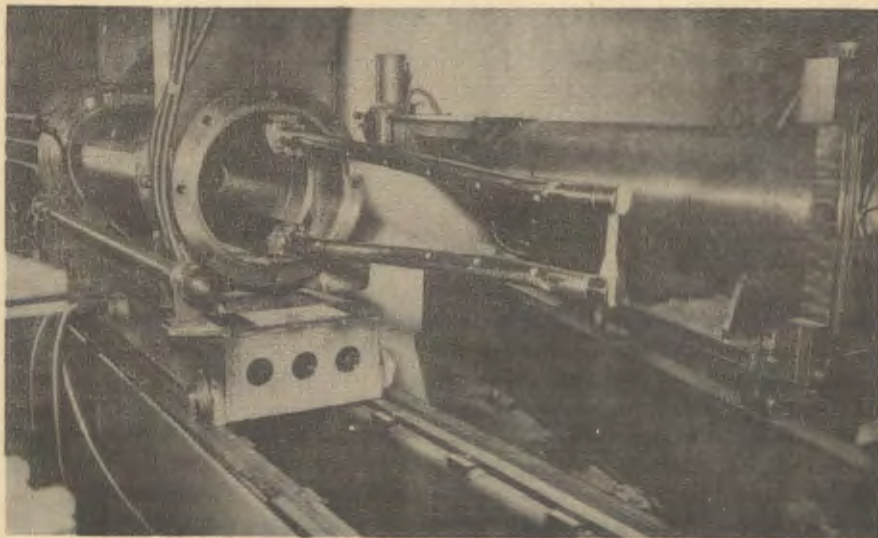


Рис.15. Ионный источник.

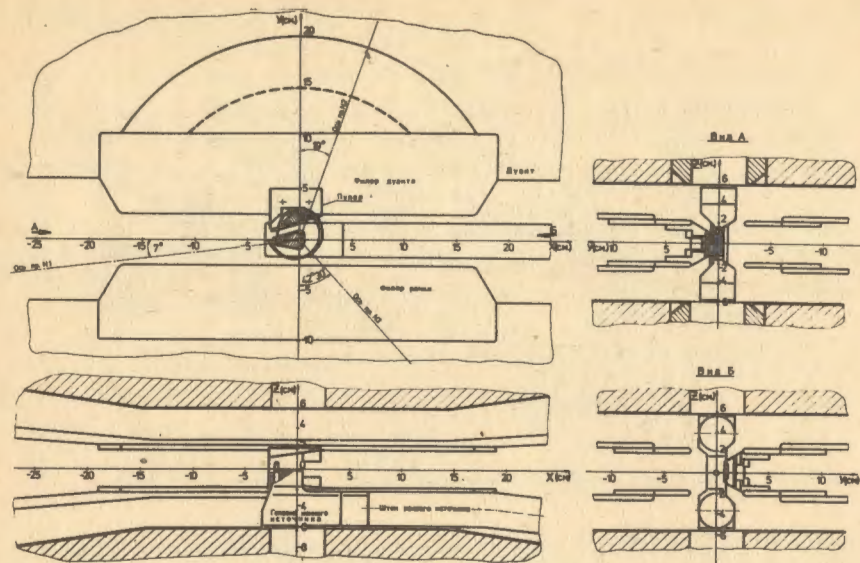


Рис.16. Геометрия центра ускорителя.

/рис.16/. Для вытягивания ионов из источника и формирования пучка используется пуллер, закрепленный на дуанте. Щель в ИИ имеет радиальную ширину 1 мм и вертикальный размер 20 мм. Зазор между ИИ и пуллером составляет 7 мм. Перемещение ИИ вдоль дуанта позволяет оптимизировать его положение относительно пуллера.

В вертикальном ионном источнике, который вводится сквозь ярмо, вместо накалимого используется холодный полостной катод.

СИСТЕМА ВЫВОДА ПУЧКА

Схема вывода пучка из камеры ускорителя показана на рис.17. Применяемый в фазотроне регенеративный метод вывода пучка /7/ использует для раскачки радиальных колебаний в области конечных радиусов три локальных неоднородности магнитного поля /возбудитель, регенератор и дополнительный регенератор/. Головная часть канала вывода представляет собой железно-токовую секцию с толщиной септума 4 мм.

Поля в регенераторе и возбудителе показаны на рис.18, на траектории внутри канала снижения поля достигает 5 кГс. Есть возможность регулировать радиальное положение возбудителя, регенератора и канала без нарушения вакуума.

Для шиммирования возмущений, вносимых каналом в основное поле ускорителя, используются как элементы, расположенные на

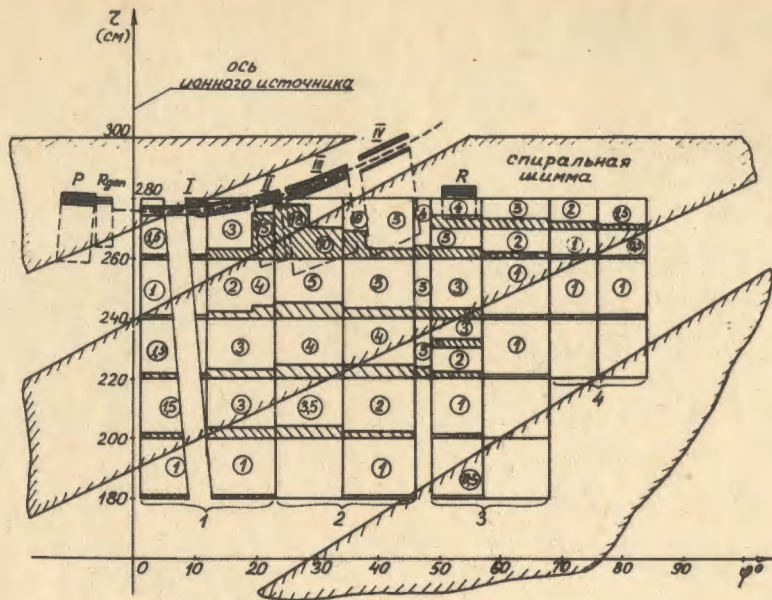


Рис.17. Схема расположения системы вывода пучка.

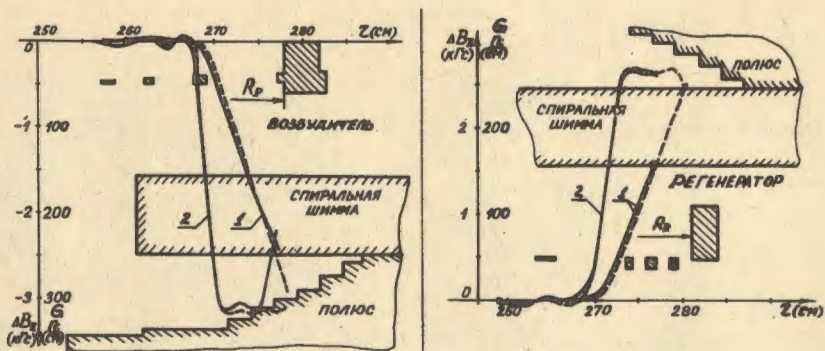


Рис.18. Поперечное сечение возбуждителя и регенератора и распределение магнитного поля /1/ и его градиента /2/ вдоль радиуса; - - - - расчет, ——— эксперимент.

самом канале, так и специальные съемные панели, установленные внутри камеры ускорителя на верхнем и нижнем полюсах. Такая конструкция позволяет разделить задачи формирования основного поля и поля системы вывода.

ФИЗИЧЕСКИЙ ЗАПУСК

Работы по ускорению пучка в фазотроне выполнялись в два этапа. Вначале, в 1984 г., протоны были ускорены до конечной энергии 680 МэВ /радиус 270 см/ внутри ускорителя. Затем, в 1985 г., пучок протонов был выведен из камеры ускорителя.

Для диагностики ускоренного пучка использовались следующие средства. До радиуса 1 м /энергия протонов - 70 МэВ/ ток пучка измерялся трехламельными пробниками, что давало также информацию о положении орбиты по радиусу и вертикали. Типичная зависимость тока пучка от радиуса показана на рис.19 /кривая 1/.

В 1985 г. улучшение вакуумных условий и оптимизация высокочастотной системы позволили получить ускоряющее напряжение с амплитудой 30÷35 кВ при скважности 1. Зависимость тока пучка от радиуса в этом режиме показана на том же рисунке кривой 2.

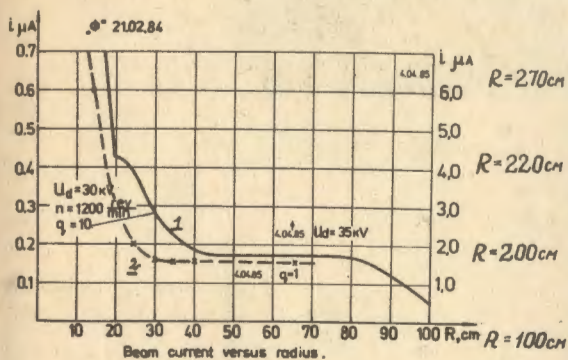


Рис.19. Зависимость тока пучка от радиуса: 1/q = 10; 2/q = 1.

ускоряющее напряжение

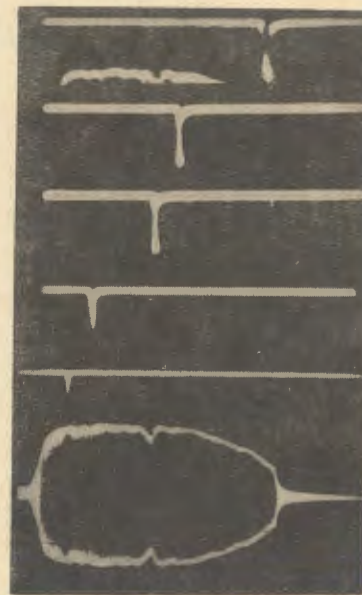


Рис.20. Осциллограммы излучения из мишени.

Осциллограммы импульса пучка излучений
Развертка 0,5 нс/дел.

На радиусах, больших 1 м, где пробег ускоряемых частиц /в медной мишени/ превышает 1 см, наличие ускоренного пучка фиксировалось по гамма- и нейтронному излучению, образующемуся при взаимодействии пучка с мишенью пробника, по автографам пучка на стекле и по пикап-электродам.

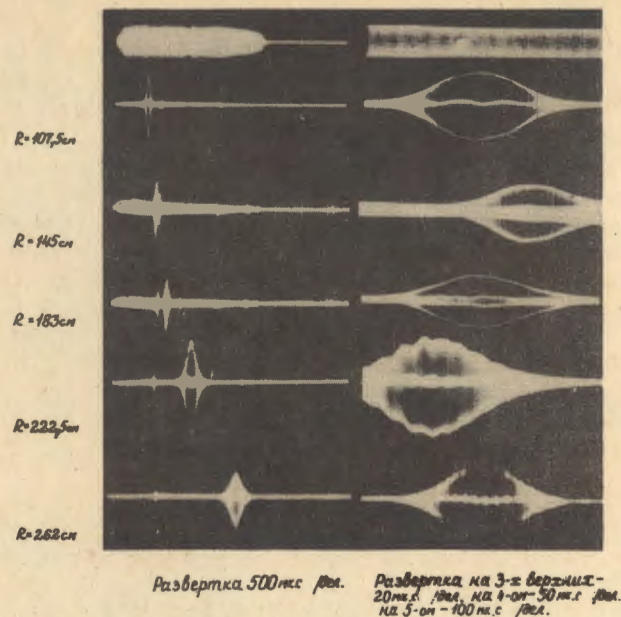


Рис.21. Сигналы с пикап-электродов.

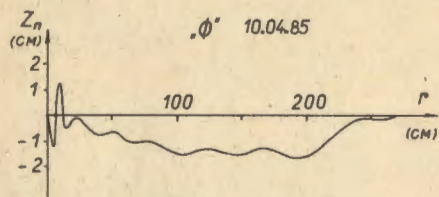


Рис.22. Положение пучка по вертикали.

Рис.23. Определение величины заброса по распределению активности.

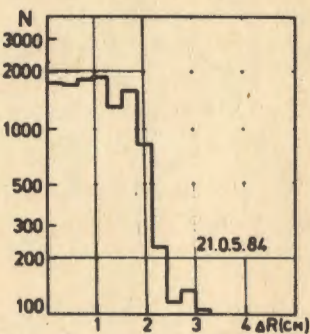


Рис.24. Автограф выведенного пучка на входе СП-35.

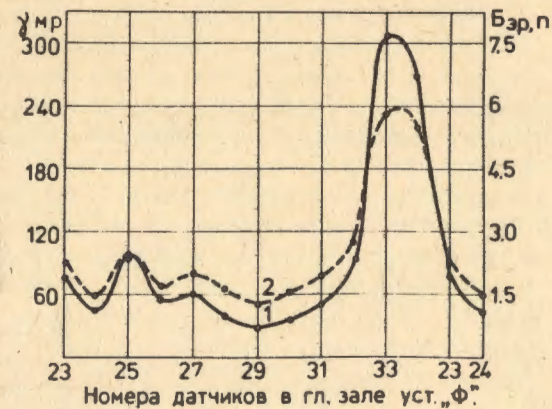
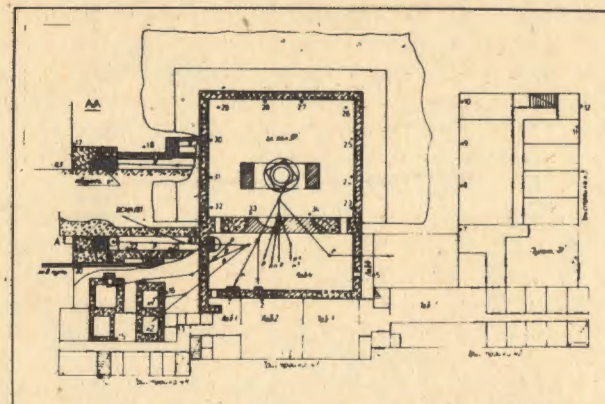
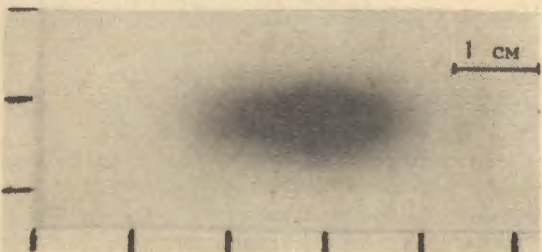


Рис.25. Расположение датчиков системы дозиметрического контроля и распределение излучения в зале ускорителя.

Для регистрации нейтронного и γ -излучения используется сцинтилляционный детектор, импульс с которого подается на вход осциллографа, синхронизованного с ускоряющим напряжением. При перемещении установленной на пробнике мишени по радиусу импульс с детектора перемещается во времени, что позволяет коррелировать время появления импульса с радиусом и частотой ускоряющего напряжения. Эта методика позволяет также регистрировать потери пучка при ускорении по появлению нескоррелированных импульсов. Несколько осциллограмм такого типа показано на рис.20. Осциллограммы относятся к радиусам мишени 50, 100, 200, 220, 270 см. Развертка по горизонтали - 0,5 мс/дел. Видно, что потери пучка в процессе ускорения практически отсутствуют.

В ускорителе установлено 5 пикап-электродов на радиусах 107,5; 145; 183; 222,5; 262 см, регистрирующих сигнал, наводимый на них проходящим пучком. Радиальная протяженность электродов составляет соответственно 15, 10, 6, 5 и 4 см. Осциллограммы таких сигналов, показанные на рис.21, свидетельствуют о наличии пучка на этих радиусах. Величина тока пучка, если ее оценить по амплитуде наведенного сигнала, соответствует измеренной с помощью пробника.

С помощью автографов было определено положение пучка по вертикали в процессе его ускорения и вертикальный размер. Положение пучка по вертикали показано на рис.22. Его вертикальный размер на всех радиусах не превышает 15 мм. Эта же методика использовалась при определении величины заброса частиц в выводной канал^{/8/} и размеров выведенного пучка. Кроме того, для детектирования пучка в зоне вывода использовалось измерение наведенной активности в тонких алюминиевых фольгах со свинцовой подложкой. Интенсивность выведенного пучка измерялась также ионизационной камерой. Результаты исследований вывода пучка представлены на рис.23 /величина заброса/ и 24 /размеры выведенного пучка/. Величина коэффициента вывода по этим измерениям составляет 50÷70%.

Контроль радиационной обстановки в здании ускорителя осуществляется с помощью автоматизированной системы дозиметрического контроля. На рис.25 показано расположение датчиков и интегральное распределение поля излучения по периметру защитных стен внутри главного зала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ускорение пучка до конечного радиуса и вывод его из камеры ускорителя экспериментально продемонстрировали принципиальную работоспособность фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джелепов В.П. и др. IEEE Trans., 1983, NS-30, No.4, p.2134.
2. Аленицкий Ю.Г. и др. ОИЯИ, P9-81-664, Дубна, 1981.
3. Ворожцов С.Б. и др. ОИЯИ, P9-81-711, Дубна, 1981.
4. Ворожцов С.Б. и др. ОИЯИ, P9-84-25, Дубна, 1984.
5. Глазов А.А. и др. ОИЯИ, P9-84-585, Дубна, 1984.
6. Глазов А.А. и др. ОИЯИ, P9-84-586, Дубна, 1984.
7. Заплатин Н.Л. и др. Труды VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1983, т.2, с.87.
8. Ворожцов С.Б. и др. ОИЯИ, P9-84-594, Дубна, 1984.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 мая 1985 года.

Вниманию организаций и лиц, заинтересованных в получении публикаций Объединенного института ядерных исследований

Принимается подписка на препринты и сообщения Объединенного института ядерных исследований.

Установлена следующая стоимость подписки на 12 месяцев на издания ОИЯИ, включая пересылку, по отдельным тематическим категориям:

ИНДЕКС	ТЕМАТИКА	Цена подписки на год
1.	Экспериментальная физика высоких энергий	10 р. 80 коп.
2.	Теоретическая физика высоких энергий	17 р. 80 коп.
3.	Экспериментальная нейтронная физика	4 р. 80 коп.
4.	Теоретическая физика низких энергий	8 р. 80 коп.
5.	Математика	4 р. 80 коп.
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия	4 р. 80 коп.
7.	Физика тяжелых ионов	2 р. 85 коп.
8.	Криогеника	2 р. 85 коп.
9.	Ускорители	7 р. 80 коп.
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных	7 р. 80 коп.
11.	Вычислительная математика и техника	6 р. 80 коп.
12.	Химия	1 р. 70 коп.
13.	Техника физического эксперимента	8 р. 80 коп.
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами	1 р. 70 коп.
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях	1 р. 50 коп.
16.	Дозиметрия и физика защиты	1 р. 90 коп.
17.	Теория конденсированного состояния	6 р. 80 коп.
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники	2 р. 35 коп.
19.	Биофизика	1 р. 20 коп.

Подписка может быть оформлена с любого месяца текущего года.

По всем вопросам оформления подписки следует обращаться в издательский отдел ОИЯИ по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79.