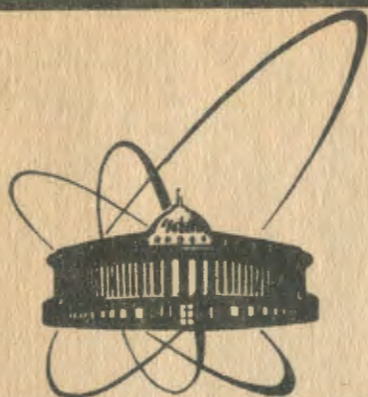


89-24



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

P9-89-27

Б.В.Василишин, В.И.Волков, И.В.Зайцев,
Л.П.Зиновьев, И.Б.Иссинский, С.В.Костюченко,
В.Д.Кравцов, Е.А.Матюшевский, С.А.Новиков,
Д.В.Уральский

ВТОРОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ВЫВОДА ПУЧКА
ИЗ СИНХРОФАЗОТРОНА

1989

ВВЕДЕНИЕ

Второе направление вывода пучка из синхрофазотрона^{/1/} первоначально было создано для облучения пузырьковых камер первичными частицами, что требовало очень низких интенсивностей за короткий интервал времени. Впоследствии длительность вывода пучка была увеличена, однако его интенсивность во внешнем канале не превышала долей процента от направляемой в септум-магнит из-за большого поперечного размера пучка на выходе из кольца, существенно превышающего апертуру транспортировочных устройств.

Большой размер пучка на выходе из квадранта определяется прохождением значительной части трассы в сильно спадающем краевом магнитном поле, дефокусирующем пучок по горизонтали. На вертикальное движение это поле также оказывает в сумме дефокусирующее действие, так как после прохождения наиболее быстро спадающего по радиусу участка краевого поля пучок имеет по вертикали сильную угловую сходимость, меняющуюся после вертикального кроссовера в районе выхода из квадранта на расходимость. Значительное расстояние ≈ 30 м/ от септум-магнита /МД/ до дефокусирующего участка поля не позволяет эффективно воздействовать на пучок с помощью фокусирующей системы, расположенной в районе МД.

В связи с возросшим в последние годы количеством экспериментальных групп, использующих пучки ядер, ускоряемых в синхрофазотроне, была разработана система, позволяющая довести до канала транспортировки пучка $40 \div 50\%$ его интенсивности. Суть работы состояла в изменении краевого магнитного поля путем шиммирования^{/6/} участка трассы пучка. Предварительные расчеты показали, что наилучший эффект достигается, если в районе наибольшего спада магнитного поля дефокусирующий участок длиной ≈ 4 м заменить на фокусирующий. В этом случае участок трассы пучка в краевом поле квадранта эквивалентен триплету ДФД, где роль первой линзы Д играет участок краевого поля перед шиммой, шиммированный участок эквивалентен линзе Ф, а участок поля после шиммы играет роль второй линзы Д. Задача расчета сводилась к получению значений азимута и длины шиммированного участка, а также градиента магнитного поля в нем, обеспечивающих оптимальные характеристики пучка на выходе из квадранта.

РАСЧЕТ СИСТЕМЫ

Начальные условия для расчета на входе в МД были получены путем моделирования условий медленного вывода на синхрофазотроне с помощью программы MFIELD^{/2/}. Импульсный разброс циркулирующего пучка принимался при этом равным $\Delta p/p_0 = \pm 0,0004$. Горизонтальный и вертикальный фазовые портреты пучка на входе в МД показаны на рис. 1 и 2. Представленные на них фазовые области относятся к четырем последовательным характерным моментам вывода. Первый момент - начало вывода частиц с наименьшим импульсом $p = p_0 \cdot 0,9996/$. Мгновенный импульсный разброс выводимого пучка в это время равен нулю и увеличивается в интервале между первым и вторым моментами. Второй момент - окончание вывода частиц с минимальным импульсом. В это же время начинается вывод для частиц с импульсом $p = p_0 \cdot 1,00013$, и, следовательно, импульсный разброс выводимого пучка составляет в этот момент $\Delta p = p_0/1,00013 - 0,9996/ = p_0 \cdot 0,00053$.

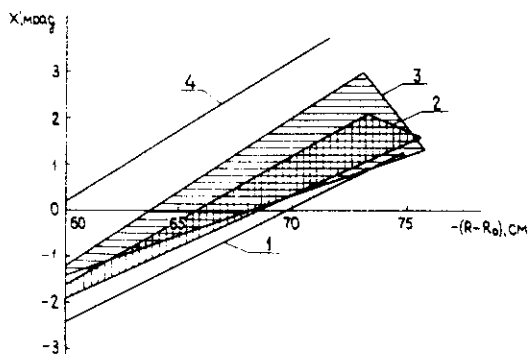
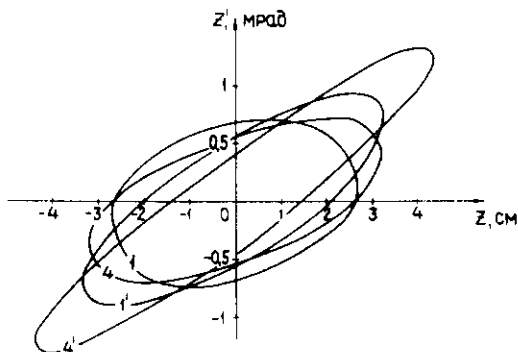


Рис. 1. Горизонтальный фазовый портрет пучка на входе в отклоняющую систему /МД-ЛД/. Цифрами 1, 2, 3 и 4 показаны фазовые области пучка в соответствующие моменты вывода.

Рис. 2. Вертикальный фазовый портрет пучка на входе в отклоняющую систему. Цифрой 1 показан вертикальный фазовый эллипс пучка, соответствующий присептумным частицам в начале вывода, 4 - в конце вывода. Цифры 1' и 4' показывают вертикальные фазовые эллипсы, относящиеся к наиболее удаленным от септума частицам в начале и конце вывода соответственно.



В дальнейшем импульсный разброс выводимого пучка практически не меняется, и в третий момент времени, когда начинается вывод частиц с наибольшим $p = p_0 \cdot 1,0004$ импульсом и заканчивается для частиц с импульсом $p = p_0 \cdot 0,99982$, составляет $\Delta p = p_0 / 1,0004 - 0,99982 = p_0 \cdot 0,00058$. Далее импульсный разброс выводимого пучка уменьшается до нуля, когда заканчивается вывод для частиц с максимальным импульсом /четвертый момент/.

При расчете движения пучка через первый квадрант в качестве начальных условий принимались фазовые области пучка в каждый из указанных моментов времени в отдельности, и для каждого из них подбиралось значение поля в МД такое, чтобы отклонить ось выводимого пучка в конце квадранта на радиус $R_0 + 250$ см, соответствующий входу в канал транспортировки. При этом подбиралось такое значение градиента в линзе отклоняющей системы /ЛД/, чтобы обеспечить минимальный горизонтальный размер пучка в середине II прямолинейного промежутка. Расчеты проводились по программе FORM³, позволяющей моделировать движение частиц в квадранте с учетом его краевых и рассеянных полей, а также задаваемых возмущений. Основные расчеты выполнялись для индукции магнитного поля $B_0 = 0,5$ Тл.

Расчеты движения пучка через первый квадрант можно разбить на 3 этапа. На первом этапе были определены примерное значение градиента на шиммированном участке, а также азимутальная его протяженность и положение по азимуту и радиусу, обеспечивающие при соответствующих значениях поля в МД и градиента в ЛД минимальные размер и расходимость пучка на выходе квадранта. Азимутальная протяженность шиммы будет оптимальна в том случае, когда пучок проходит в шиммированной области квадранта лишь участок с достаточно постоянным градиентом магнитного поля. Определенная таким образом азимутальная протяженность шиммы составляет около 4 м и принята из конструктивных соображений равной расстоянию между осями окон /3,8 м/. При этом оптимальное значение градиента на шиммированном участке лежит в интервале $0,85 \pm 1,0$ Тл/м, азимут начала шиммы находится между окнами № 8 и 9 и удален от оси окна № 8 на 1/4 расстояния между ними.

Второй этап расчета состоял в получении конфигураций шимм, обеспечивающих указанное значение градиента, и в вычислении распределения поля на шиммированном участке путем численного моделирования.

Для расчета магнитного поля в двумерном приближении использовался комплекс программ из⁴, в котором применяется интегральная постановка задачи магнитостатики.

Для оценки точности вычислений, а также правомерности двумерного приближения был проведен расчет магнитного поля в сред-

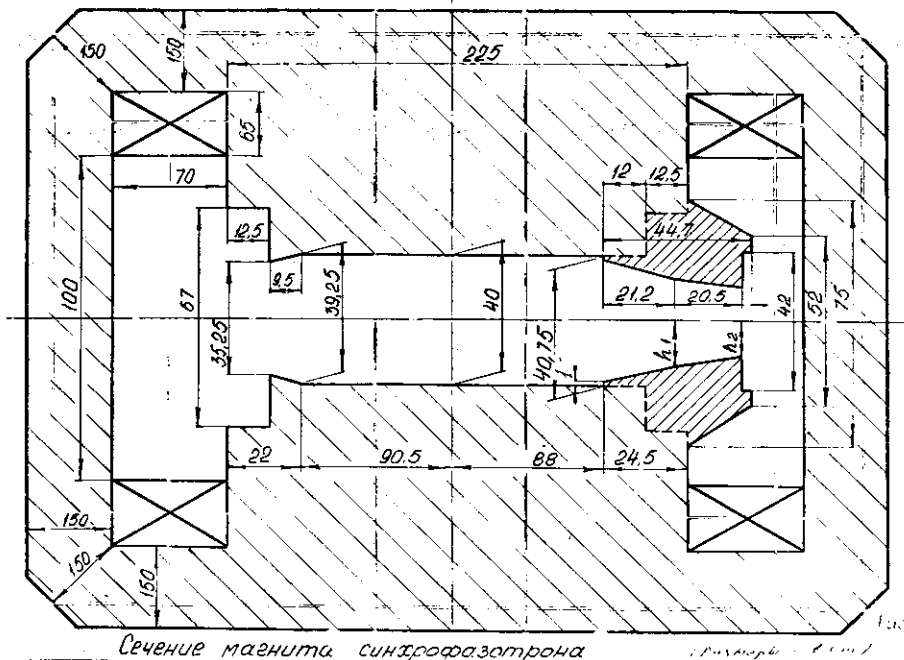


Рис. 3. Конфигурации магнита синхрофазотрона и шимм, выбранные для расчета. Размеры указаны в сантиметрах.

ней плоскости вакуумной камеры синхрофазотрона без шимм. Сравнение с измеренными данными показало высокую степень совпадения. Расхождение в 1% имеет место лишь вне рабочей камеры. В рабочей области данные совпадают на уровне 0,1%. Различие измеренного и расчетного результатов обусловлено, по-видимому, наличием мелких конструктивных элементов, не учтенных при дискретизации области полюсов.

Конфигурации магнита синхрофазотрона и шимм, выбранные для расчета, приведены на рис. 3. Параметры h_1 и h_2 подбирались таким образом, чтобы обеспечить требуемый градиент возрастания магнитного поля. При выборе параметров h_1 и h_2 также учитывалось, что для достижения наилучшей линейности контур шиммы должен аппроксимировать гиперболу с асимптотами, параллельными осям координат.

На рис. 4 приведены результаты численного моделирования при индукции $B_0 = 0,5$ Тл для различных значений h_1 и h_2 . На рис. 5 показаны распределения магнитного поля при $h_1 = 13,12$ см, $h_2 = 10$ см и нескольких значениях индукции магнитного поля. Полу-

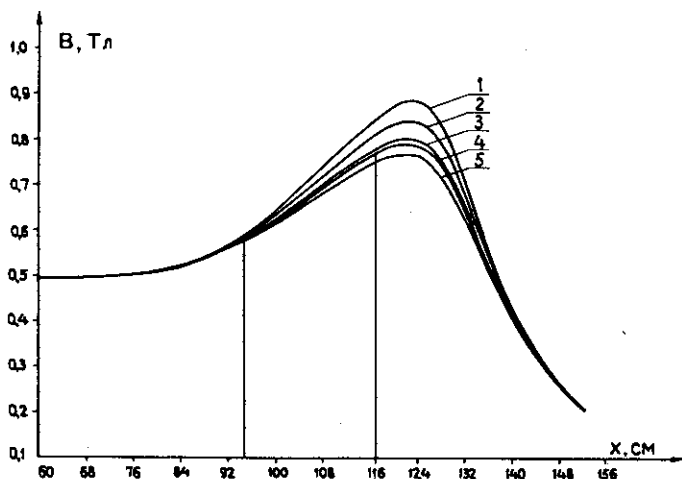


Рис. 4. Распределение магнитного поля на шиммированном участке при $B_0 = 0,5$ Тл и следующих значениях h_1 и h_2 :
 1/ $h_1 = 131,2$ мм, $h_2 = 94$ мм ($G = 120$ Гс/см);
 2/ $h_1 = 131,2$ мм, $h_2 = 100$ мм ($G = 105$ Гс/см);
 3/ $h_1 = 131,2$ мм, $h_2 = 100$ мм и учтены щели между элементами шимм ($G = 98$ Гс/см);
 4/ $h_1 = 136,4$ мм, $h_2 = 106$ мм ($G = 93$ Гс/см);
 5/ $h_1 = 138$ мм, $h_2 = 108$ мм ($G = 87$ Гс/см);
 6/ $h_1 = 131,2$ мм, $h_2 = 112$ мм ($G = 70$ Гс/см).

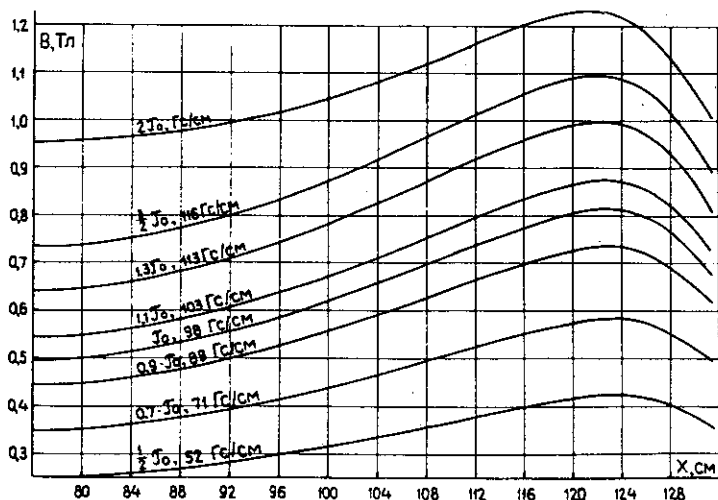


Рис. 5. Распределение магнитного поля при $h_1 = 131,2$ мм, $h_2 = 100$ мм и различных значениях тока в обмотках возбуждения электромагнита. J_0 - ток, соответствующий значению индукции $B_0 = 0,5$ Тл. Учтены щели между элементами конструкции шимм.

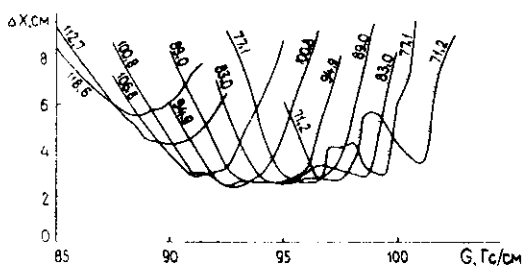


Рис. 6. Зависимость горизонтального размера выведенного пучка в середине прямолинейного промежутка от градиента в шиммированном участке для различных его азимутальных положений. На каждой кривой указано соответствующее расстояние в см начала шимми от окна № 8.

чено, что градиент на шиммированном участке пропорционален B_0 лишь до $B_0 \approx 0,55$ Тл. В дальнейшем сильно сказывается эффект насыщения железа.

На третьем этапе полученные распределения магнитного поля шиммированного участка, соответствующие градиентам 0,87, 0,93 и 1,05 Тл/м /см. рис. 4/, были заложены в программу FORM в качестве опорных. При расчетах с произвольным значением градиента программа строила соответствующее распределение магнитного поля шиммированного участка путем интерполяции опорных. Эти расчеты позволили уточнить окончательное оптимальное значение градиента шиммированного участка, составившее 0,98 Тл/м при $B_0 = 0,5$ Тл, что достигается при $h_1 = 13,12$ см, $h_2 = 10$ см.

Введение шимми значительно уменьшает вертикальные размер до 10÷12 см и угловую расходимость /до 10 - 14 мрад/ пучка на выходе из квадранта, причем эти характеристики слабо меняются при изменении градиента шиммированного участка и его азимутального положения. В то же время горизонтальные характеристики пучка очень критичны по отношению к этим параметрам. Результаты расчетов в горизонтальной плоскости приведены на рис. 6, на котором показана зависимость горизонтального размера пучка в середине 2-го прямолинейного промежутка от градиента на шиммированном участке для различных азимутов его начала. Каждая кривая этого рисунка соответствует различному расстоянию начала шимми от оси окна № 8. Видно, что оптимальные условия достигаются при расстояниях 85 - 95 см. В этом случае горизонтальный размер пучка в середине второго промежутка составляет 2,5 см, причем существует интервал значений градиента на шиммированном участке /"плато"/, при котором размер пучка практически не зависит от градиента. Вне этого интервала размер пучка резко возрастает с удалением градиента от области "плато". Из рис. 6 также видно, что с удалением начала шимми от указанных оптимальных значений горизонтальный размер

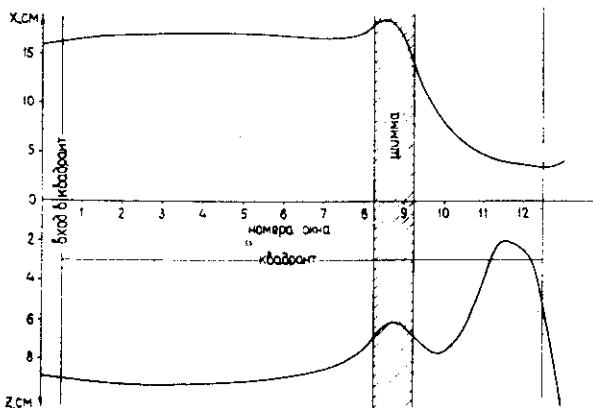


Рис. 7. Горизонтальная /верхняя часть/ и вертикальная /нижняя часть/ огибающие пучка при движении через квадрант № 1.

пучка в середине прямолинейного промежутка возрастает и сильно зависит от значений градиента.

Для ускорения времени счета данные на рис. 6 были получены без учета вертикального движения. При подробном расчете в обеих плоскостях характер приведенных кривых сохраняется, лишь минимальный горизонтальный размер увеличивается в 1,7 раза.

На рис. 7 показаны горизонтальная и вертикальная огибающие пучка вдоль его трассы внутри квадранта. Эти же данные и положение горизонтальной оси пучка от отношению к R_0 приведены в таблице. На рис. 8 и рис. 9 показаны горизонтальный и вертикальный фазовые портреты пучка в середине промежутка № 2. В горизонтальной плоскости размер пучка составляет 4,4 см, а расходимость 6,2 мрад, а в вертикальной - 11 см и 15 мрад соответственно. Горизонтальный эмиттанс выведенного пучка составляет 71 п. мм·мрад, а вертикальный - 78 п. мм·мрад. Положение

оси пучка в середине промежутка равно $R_0 + 365,5$ см, а угол составляет 0,28825 с продольной осью прямолинейного промежутка.

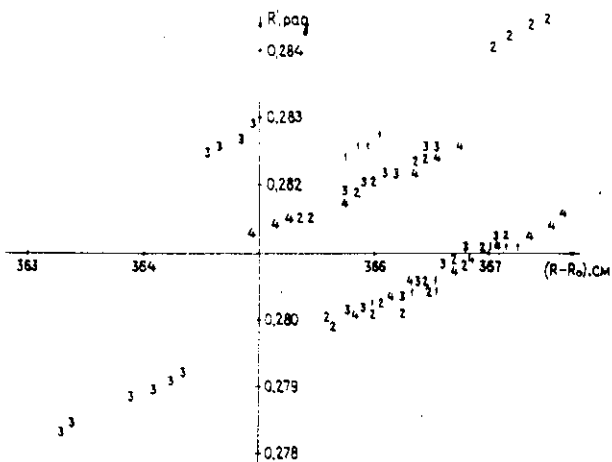


Рис. 8. Горизонтальный фазовый портрет выведенного пучка в середине прямолинейного промежутка. Цифры указывают, к какому моменту вывода относится соответствующая точка в фазовой плоскости.

Таблица

Положение оси выводимого пучка и его горизонтальный и вертикальный размеры в 1-м квадранте для поля ускорителя $V_0 = 0,5 \text{ Тл}$

Азимут	Ось ($R-R_0$, см)	Горизонтальный размер, см	Вертикальный размер, см
вход в МД	-67,9	15,8	8,8
вход в квадрант	-50,6	16,4	8,9
окно № 1	-42,7	16,6	9,0
"- 1,5 *	-33,1	16,8	9,1
"- 2	-23,4	16,9	9,2
"- 2,5	-13,7	17,0	9,2
"- 3	- 3,9	17,0	9,3
"- 3,5	5,8	17,1	9,3
"- 4	15,4	17,1	9,3
"- 4,5	25,1	17,0	9,2
"- 5	34,7	17,0	9,1
"- 5,5	44,2	16,9	9,0
"- 6	53,7	16,9	8,9
"- 6,5	63,2	16,7	8,7
"- 7	72,5	16,6	8,5
"- 7,5	81,9	16,5	8,2
"- 8	91,4	17,1	7,5
"- 8,25 (начало ШИММЫ)	96,4	17,9	6,9
"- 8,5	101,2	18,5	6,3
"- 9	107,5	16,5	6,3
"- 9,25 (конец ШИММЫ)	108,7	14,0	6,8
"- 9,5	109,6	11,4	7,4
"- 10	114,4	7,8	7,6
"- 10,5	124,0	5,8	6,4
"- 11	140,1	4,6	4,1
"- 11,5	164,9	4,0	1,9
"- 12	200,7	3,6	2,4
выход из квадранта	250,2	3,5	5,2
оередина прямолинейного промежутка	365,5	4,4	11,0

* Номер окна 1,5 означает, что данная точка находится от оси окна № 1 на расстоянии 0,5 интервала между осями окон.

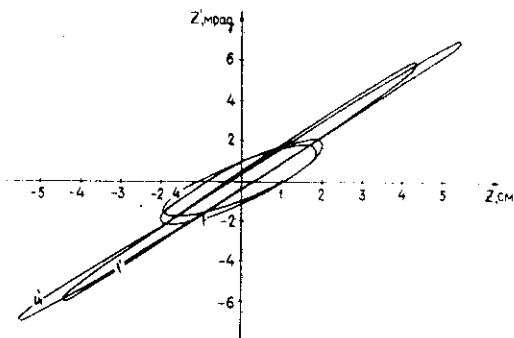


Рис. 9. Вертикальный фазовый портрет выведенного пучка в середине прямолинейного промежутка. Цифрой 1 показан вертикальный фазовый эллипс пучка, соответствующий присептумным частицам в начале вывода, 4 – в конце вывода. Цифры 1' и 4' показывают вертикальные фазовые эллипсы, относящиеся к наиболее удаленным от септума частицам в начале и конце вывода.

Полученное распределение магнитного поля на шиммированном участке обеспечивает оптимальные условия вывода на всех индукциях до $B_0 = 0,55$ Тл. При больших значениях индукции из-за насыщения в шиммах градиент магнитного поля ниже требуемого оптимального, что приводит к увеличению размеров пучка на выходе квадранта. Кроме того, в результате уменьшения величины B/B_0 , где B – среднее значение магнитного поля на шиммированном участке, ось пучка смещается наружу по отношению к трассе канала вывода. Оценки показали, что при $B_0 = 1$ Тл 5 – 10% интенсивности пучка, отклоненного в МД, проходят через канал транспортировки внутри квадранта. При этом на выходе из квадранта ось выведенного пучка составляет 0,007 рад с осью канала внешней транспортировки, что требует установки дополнительного дипольного магнита для коррекции этого угла.

КОНСТРУКЦИЯ

Вывод пучка производится через боковую стенку вакуумной камеры 2-го квадранта с внешней стороны. Это потребовало переделки вакуумной камеры, примыкающей к 10 полюсным наконечникам /рис.10, 11/.

Необходимая конфигурация поля в области, где пучок выходит за пределы существующих полюсов, создается дополнительными полюсными наконечниками – шиммами /1/ из стали /3/, закрепленными на полюсах магнита ускорителя. Внешний конец шимм опирается на трапецеидальные немагнитные вставки /2/ из стали 12X18H9T, выполняющие функцию распорок.

Шиммы /1/ с внешней стороны ускорителя закрыты высоковакуумной камерой, которая стыкуется с ныне существующей на ускорите-

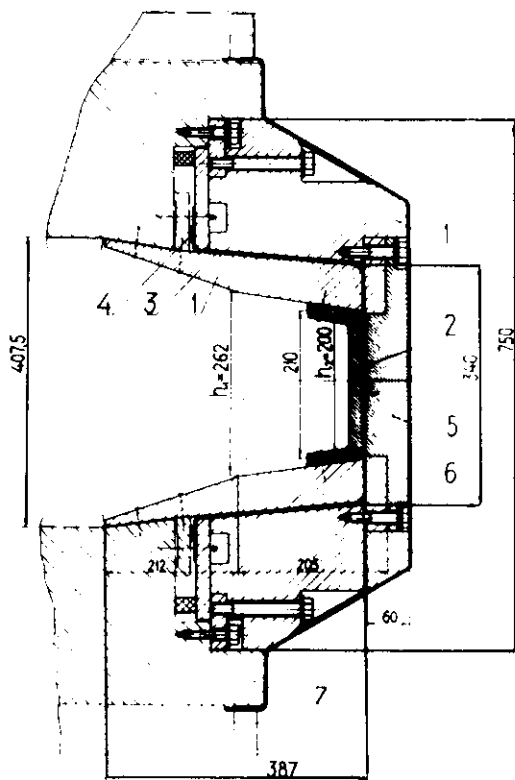


Рис.10. Поперечное сечение шиммированного участка. 1 - шиммы, 2 и 5 - распорки, 3 - стенка высоковакуумной камеры, 4 - вакуумное уплотнение, 6 - стенка форвакуумной камеры, 7 - полюс электромагнита.

ле и выполнена в виде тонкостенной /толщина 2 мм/ коробчатой конструкции /3/.

Стенка своими отбортовками крепится на существующих уплотнительных накладках. Наружная часть шимм /1б/ крепится к боковой поверхности магнита ускорителя. Уплотнение производится с помощью уплотнителя /4/ из вакуумной резины.

Создание такой тонкостенной конструкции, имеющей сложный присоединительный контур, - весьма сложная технологическая задача, которую удалось решить изготовлением по частям с последующей сваркой на стенде, имитирующем конфигурацию двух пар соседних полюсных наконечников. На стенде были проведены также вакуумные испытания.

Выступающая часть конструкции окружена форвакуумной камерой, силовые элементы которой выполнены из опорных дюралевых башмаков, прикрепленных к полюсам аналогично шиммам /1б/, и вставок /5/ между ними. Уплотнение объема форвакуумной камеры достигается за счет листовой резины /6/, закрепленной на башмаках

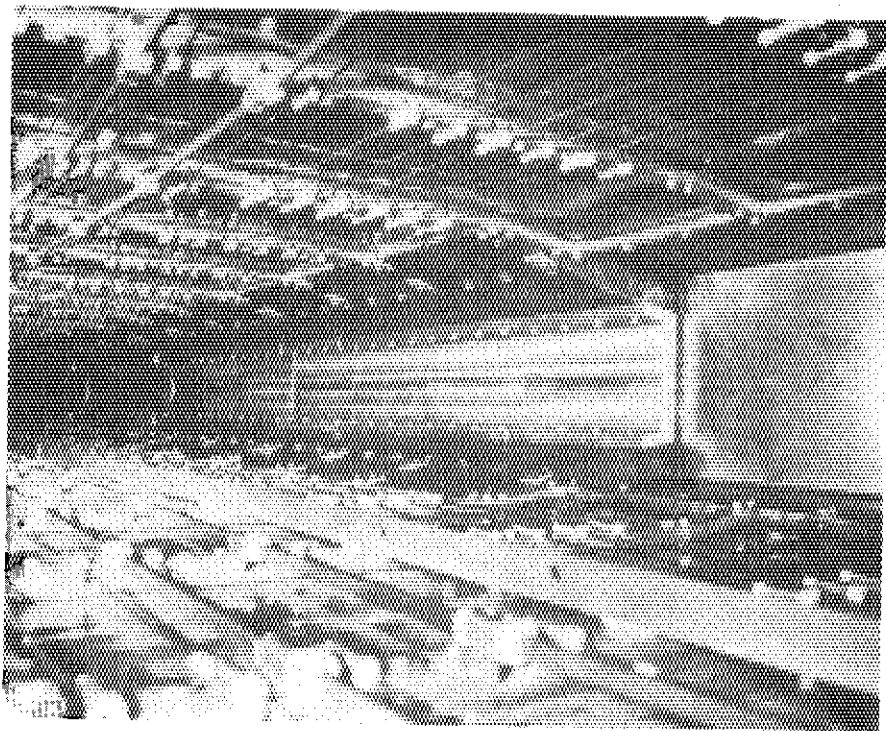


Рис.11. Общий вид камеры на шиммированном участке.

и переходящей на полюса синхрофазотрона /7/. Проход выводного патрубка через форвакуумную камеру герметизируется с помощью фланца, зажимающего резину форвакуумной камеры на трубке. Уплотнение откачного патрубка производится по аналогии с принятым и апробированным на ускорителе способом - прижимными резиновыми фланцами.

В июле 1988 г. закончен монтаж шиммированного участка и проведены первые эксперименты по выводу пучка. Измеренные характеристики вдоль трассы вывода хорошо согласуются с расчетными. На рис.12 представлено изображение пучка на азимуте окна № 10.

Полученные характеристики позволяют осуществить практически без потерь дальнейшую транспортировку пучка к экспериментальным установкам.

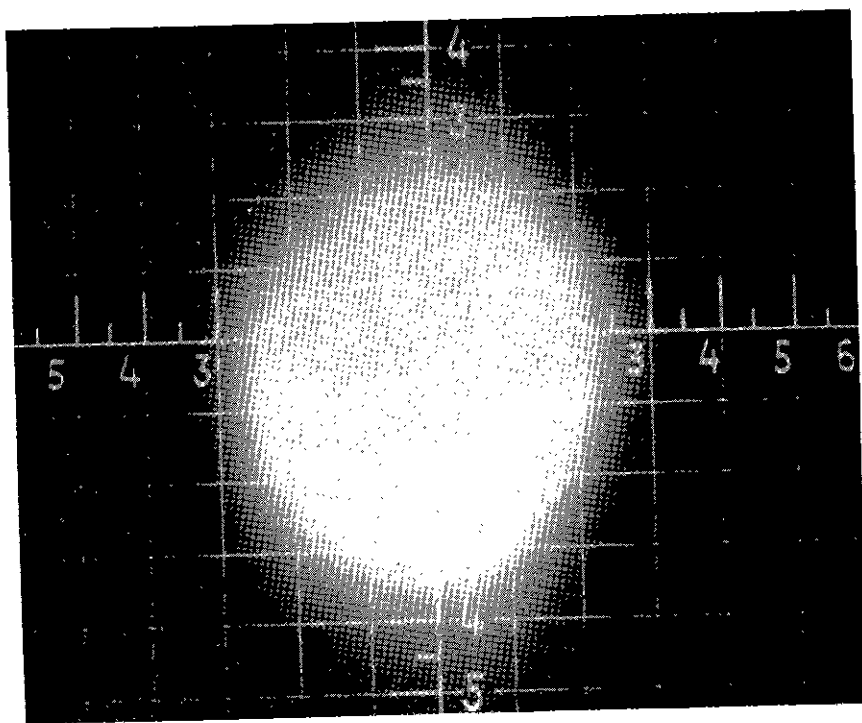


Рис.12. Изображение пучка на азимуте окна № 10.
Градуировка в сантиметрах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боков Г.А. и др. - ОИЯИ, Р9-10399, Дубна, 1977.
2. Василишин Б.В. и др. - ОИЯИ, 9-6720, Дубна, 1972.
3. Василишин Б.В. и др. - ОИЯИ, 9-7670, Дубна, 1974.
4. Акишин П.Г. и др. - ОИЯИ, Р11-86-534, Дубна, 1986.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 января 1989 года.