

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P9-87-763

В.В.Андреев, В.С.Алфеев, И.А.Шелаев, И.П.Юдин

**ОЦЕНКА ПОТЕРЬ
ИНТЕНСИВНОСТИ ПУЧКА ПРОТОНОВ
В ИНЖЕКЦИОННОМ КАНАЛЕ
СИНХРОТРОНА СПИН**

1987

1. ВВЕДЕНИЕ

На сверхпроводящем синхротроне СПИИ [1] ЛВЭ ОИЯИ, рассчитанном на ускорение протонов до энергий 1,5 ГэВ, ведутся исследования режимов работы ускорителя. В данной работе дана оценка потерь частиц на участке инжекции пучка в кольцо ускорителя и показана возможность существенного увеличения интенсивности пучка в конце этого участка.

Монтаж инжекционного канала проводился в 1984 г. в основном в соответствии с рекомендациями работы [2] (см. там таблицу 2, где приведены проектные характеристики элементов канала). Однако в ходе монтажа в силу разного рода причин расстановка элементов была несколько изменена. В частности, линза ФИ реализована в виде выпускаемой промышленностью линзы МЛ-5 [3].

Существующая с момента завершения монтажа расстановка элементов канала приведена в таблице 1, где также представлены магнитооптические характеристики этих элементов в одном из режимов работы ускорителя.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В 1984 г. осуществлен "теплый" запуск ускорителя. Циркуляция пучка протонов в режиме инжекции (энергия 0,500 МэВ) наблюдалась в течение 90 мс в октябре 1984 г. и в мае 1985 г. - 150 мс, что соответствует 30 тыс. оборотов пучка. Наблюдение циркуляции пучка проводилось емкостными датчиками. Измерения интенсивности тока пучка проводились с помощью цилиндра Фарадея, помещенного на выходе фор-инжектора, то есть перед входом пучка в инжекционный канал, а также с помощью двух пробников. Первый из них помещен на затворе (см. рис.1) внутри инжекционного канала, а второй - после выхода пучка из канала - внутри первого регулярного периода синхротрона. На входе в кольцо ускорителя фиксировался ток величиной 1 мА (октябрь 1984 г.) и около 7 мА (май 1985 г.), в то время как на входе в инжекционный канал протонный ток составлял порядка 100 мА. После прохождения магнита и линзы ФИ наблюдаемый ток пучка был равен 30 мА.

При осуществлении в сентябре 1986 г. "холодного" запуска синхротрона СПИИ потери частиц в инжекционном канале составили те же величины.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ УСКОРИТЕЛЯ ОТ 26.12.1985 г.

Моделирование потерь частиц проводилось с помощью фортран-программ INJUNA и TURN2 [2]. В первую очередь проведено моделирова-

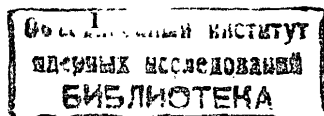


Таблица 1

Характеристики магнитооптических элементов инжекционного канала.
Режим работы от 26.12.1985 г.

Структура канала: см. таблицу 2	
Общая длина канала, м	10,87
Ускоряющий потенциал, МВ	0,500
Магнитная жесткость $B\rho$ для $^1\text{H}^{1+}$, Тл·м	0,1021888
Эмиттанс ($\epsilon_x = \epsilon_y$), $\mu\text{м} \cdot \text{мрад}$	140
Длительность импульса тока, мкс	5 + 25
Частота следования импульсов, Гц	0,25
Пространства дрейфа:	
Длина, см	L1 L2 L3 L4 L5 L6 L7 L8 L9 L10 30 12,0 92,53 52,77 60 10,8 167,5 5,1 198,6 22,4 (26,5+66,03)
Линзы:	
	$\Phi 1$ D2 $\Phi 3$ $\Phi 4$ D5 $\Phi 6$
	(M1-5)
Длина, см	30,0 15,3 15,3 25,11 27,26 4,2
(по градиенту)	
Градиент, Э/см	26,5 -144,4 94,92 77,80 -78,05 112,0
Ток в витке обмотки, А	3,6 26,9 17,67 30,0 39,57 24,0
(показания пульта), МВ	- 543 380 576 727 511
Диаметр ионопровода, мм	
	50 15x31 31x15 73 95 31x15
Магниты:	
	M1 M2 и M3
Ток в витке обмотки, А	82,63 66,69 65,82
МВ	- 639 761
(показания на пульте)	
Поле, Э	830,0 731,0 721,4
Радиус поворота, см	125 121,39
Угол поворота	90° 20,5°
Угол входа,	15° 10,25°
выхода	15° 10,25°
Длина равновесной орбиты, см	196,35 43,43
Диаметр ионопровода, мм	56 50
Сагитта, см	- 1,8

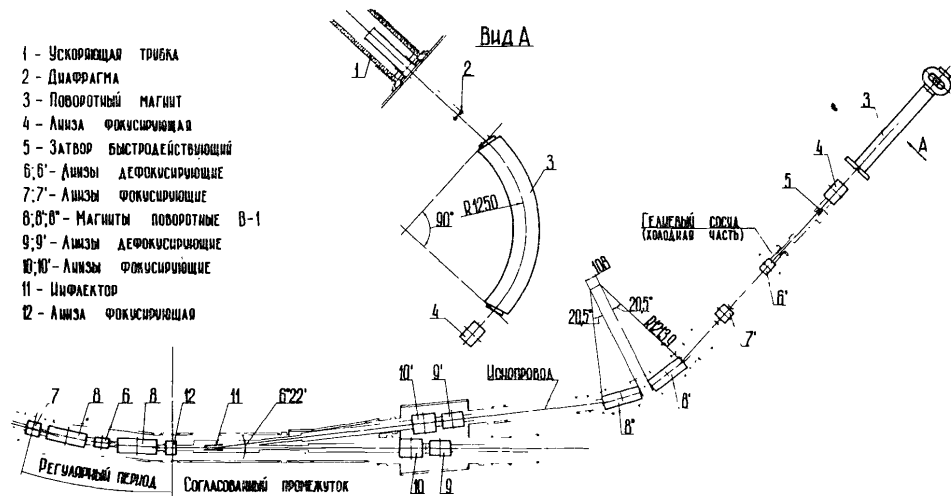


Рис.1. Схема канала инжекции пучка в СП синхротрон СПИИ.

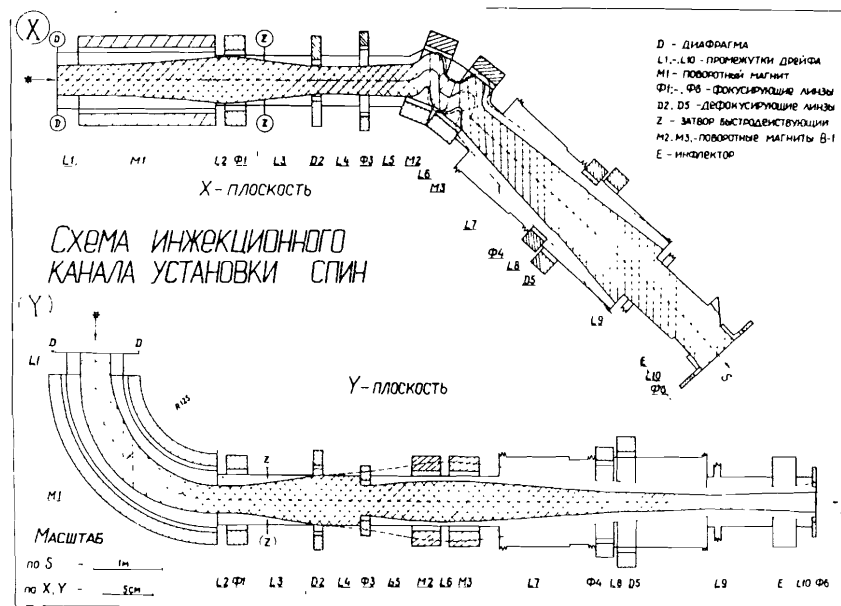


Рис.2. Прохождение пучка протонов через инжекционный канал в режиме работы от 26.12.85 г. (начальные параметры $\alpha_x = \alpha_y = 0$). Пунктиром выделен пучок, полученный без учета потерь на стенках ионопровода.

ние одного из рабочих режимов ускорителя, в качестве которого выбран режим работы от 26.12.85 г. как наиболее характерный.

Рабочие режимы при выбранной энергии инжекции пучка (0,500 МэВ) различались величинами тока в обмотках линз и магнитов канала. На рис.2 для режима работы от 26.12.85 г. (см. таблицу I) показаны x - и y -сечения пучка в исследуемом инжекционном канале. Эмиттанс пучка на входе в канал инжекции из форинжектора был принят равным $\epsilon_x = \epsilon_y = 140 \cdot \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$, при этом нормализованный эмиттанс равен $4,2 \cdot \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$.

Из рис. 2 видно, что пучок несогласован по размерам сечения, и поэтому потери интенсивности велики. Кривая роста потерь $\chi(s)$ вдоль канала представлена на рис. 3. Суммарные потери интенсивности пучка в этом режиме составили $\chi = 82,7\%$. Сечение при этом уменьшилось за счет потерь до 11% (27%) для $x(y)$ -сечения. Полученные расчетные величины потерь пучка находятся в полном согласии с имеющимися экспериментальными данными. Таким образом, причина таких потерь - в рассогласованности имеющегося канала.

4. СОГЛАСОВАНИЕ КАНАЛА ИНЖЕКЦИИ

В работе [2] при проведении согласования матрица перехода для инфлектора E отождествлялась с матрицей перехода для пространства дрейфа длиной $L = 35$ см. В данной работе эта матрица программировалась для x -плоскости по формуле [5]

$$\hat{M}^x = \begin{bmatrix} \cos Q_r \cdot d & \frac{1}{Q_r} \cdot \sin Q_r \cdot d & \frac{1}{Q_r^2} \cdot [1 - \cos Q_r \cdot d] \\ -\frac{Q_r}{1} \cdot \sin Q_r \cdot d & \cos Q_r \cdot d & \frac{1}{Q_r} \cdot \sin Q_r \cdot d \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (I)$$

где $Q_r^2 = 3 - N - \beta_0$, α - угол поворота равновесной орбиты. В нашем случае $N = 1$, $\beta_0 \approx 0$ и угол поворота невелик - $\alpha = 111$ мрад, поэтому формула (I) применима. Т.о. матричные элементы (м.э.) равны $M_{11}^x = 0,9877043$; $M_{12}^x = 35,052777$ см; $M_{13}^x = 1,949434$ см; $M_{21}^x = -0,0006972$; $M_{22}^x = 0,9877043$; $M_{23}^x = 0,1105447$.

Отметим, что действие инфлектора E на пучок в формуле (I) отождествляется с действием цилиндрического, секторного конденсатора длины L ($L = 35$ см). В действительности инфлектор представляет собой две плоские пластины, зазор между которыми изменяется вдоль траектории S по закону $d(s) = d_1 - (d_1 - d_2) \cdot s/L$, где $d_1 = 6$ см - расстояние между пластинами на входе в инфлектор и $d_2 = 4,2$ см - на выходе из него. Но и в этом случае м.э. матрицы

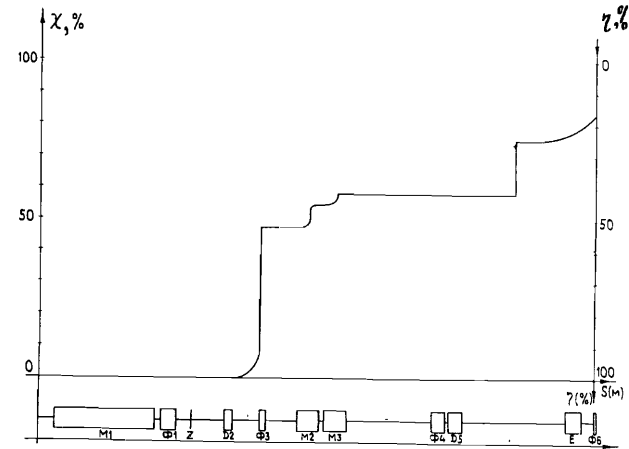


Рис.3. График зависимости потерь $\chi(s)$ интенсивности пучка вдоль канала в режиме работы от 26.12.85 г. (начальные параметры $\alpha_x = \alpha_y = 0$). Вспомогательно показан остаток интенсивности пучка $\eta(s) = 1 - \chi(s)$.

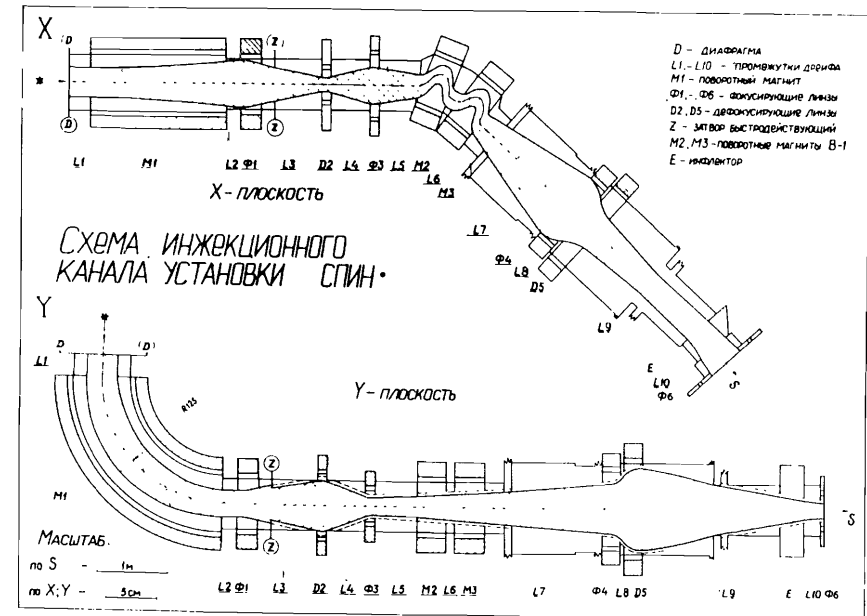


Рис.4. Прохождение пучка протонов через инжекционный канал после согласования (начальные параметры $\alpha_x = \alpha_y = 0$, пучок показан штриховкой). Пунктиром показан пучок, не отрегулированный затвором Z.

Таблица 2

Параметры согласованного инжекционного канала синхротрона СПИН

Структура канала инжекции пучка	LI-MI-L2-ΦI-L3-D2-L4-Φ3-L5-M2-L6-M3-L7-Φ4-L8-D5-L9-E-L10-Φ6									
Общая длина канала, м	10,87									
Ускоряющий потенциал, МВ	0,500									
Магнитная жесткость $B\rho$ для $^1\text{H}^{1+}$, Тл·м	0,1021888									
Эмиттанс ($\epsilon_x = \epsilon_y$), $\mu\text{л} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	140									
Длительность импульса тока, мкс	5 + 25									
Частота следования импульсов, Гц	0,25									
Пространства дрейфа:										
	LI	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10
Длина, см	30,0	21,44	83,16	52,77	60,0	10,8	167,5	5,1	198,6	22,4
	(17,13+66,03)									
ЛИНЗЫ:										
	ΦI (MI-5)	D2	Φ3	Φ4	D5	Φ6				
Длина, см (по градиенту)	30,0	15,3	15,3	25,11	27,26	4,2				
Градиент, Э/см	34,38	-104,12	126,17	79,21	-68,69	109,17				
Ток в витке обмотки:										
А	4,68	19,38	23,49	30,54	34,83	20,32				
МВ	4,68	320	505	586	639	406,4				
(показания на пульте)										
Диаметр ионопровода, мм	50	15x31	31x15	73	95	31x15				
МАГНИТЫ:										
	MI		M2		M3					
Поле, Э	817,51		841,82							
Ток в витке обмотки, А	81,38		76,81							
МВ	-		736		888					
(показания на пульте)										

M_x можно считать равными вышеприведенным. Здесь приближение матрицы к истинной связано лишь с поправкой м.э. M_{13}^x . Из простых соображений он должен равняться $d_2/2 = 2,1$ см, и таким он использовался в наших расчетах.

Согласование инжекционного канала проводилось для пучка протонов с энергией 0,500 МэВ таким же образом, как в работах [2,4]. В точке входа в канал (диафрагма D) $\alpha_x = \alpha_y = 0$, а $\beta_x = \beta_y = 150$ см. В конце инжекционного канала (конец линзы Φ6 и начало первого регулярного периода) $\alpha_x = \alpha_y = 0$, а $\beta_x = 243,4$ см и $\beta_y = 68,5$ см. В качестве участка для согласования был выбран дублет линз Φ1D2. Отметим, что при определении окончательной схемы канала инжекции были учтены все значительные изменения, возникшие после проведения монтажных работ по установке магнитооптических элементов и их прецизионной геодезической привязки согласно конструкторской документации.

Полученные характеристики окончательно согласованного инжекционного канала приведены в таблице 2. Результаты транспортировки через этот канал с полученными характеристиками показаны на рис. 4. Из рис. 4 видно, что и в этом случае существуют потери пучка в y -плоскости, хотя и небольшие. Если установить диаметр затвора Z (см. рис.4), равный 3,45 см, то потери интенсивности здесь стабилизируются на уровне 12% и далее, после затвора, пучок транспортируется без потерь.

На рис. 5 показаны размеры пучка X_{max} и Y_{max} , а также дисперсионные функции α_p^x и α_p^y . Извлекаемые из форинжектора протоны имеют [6] естественный разброс по импульсам $\Delta p/p = \pm 1 \cdot 10^{-3}$. С учетом этого разброса потери частиц в канале могут достигать ещё ~ 8% (в основном в Y -плоскости).

5. РЕЖИМЫ С РАЗЛИЧНЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ КРОССОВЕРА ПУЧКА ОТНОСИТЕЛЬНО ДИАФРАГМЫ D

Результаты предыдущего параграфа получены при идеальных начальных условиях: $\alpha = \alpha_x = \alpha_y = 0$, т. е. кроссовер пучка, извлекаемого из форинжектора, находится там, где расположена диафрагма D.

Иследуем случаи, когда этот кроссовер расположен на расстоянии L выше или ниже диафрагмы D, примерно в двухметровом диапазоне, что отвечает реальным размерам установки. Уход кроссовера от диафрагмы D приведет к изменению начального параметра α в начале канала; при этом считаем, что β_x и β_y здесь по-прежнему равны 150 см. Нетрудно показать связь между новым α в начале канала и расстоянием L :

$$\alpha = \frac{\beta}{2L} + k \cdot \sqrt{\left(\frac{\beta}{2L}\right)^2 - 1}, \quad \text{где } k = \begin{cases} +1 & \text{для } L < 0, \\ -1 & \text{для } L > 0. \end{cases}$$

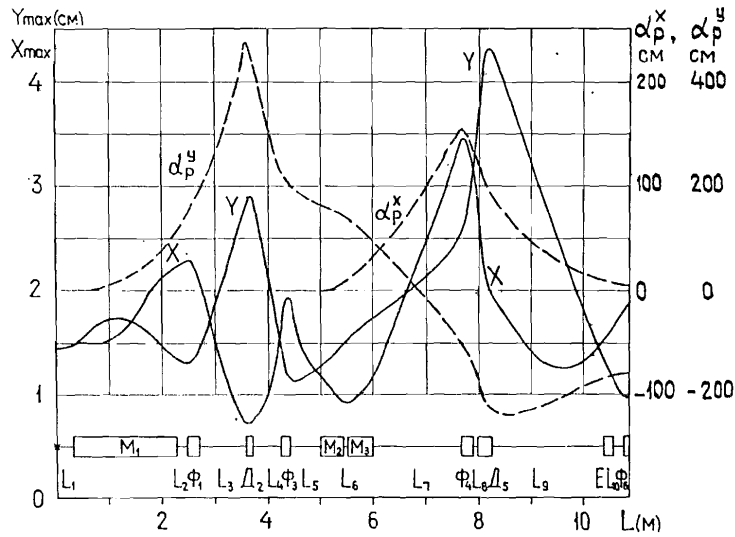


Рис.5. Размеры пучка X_{\max} и Y_{\max} , а также дисперсионные функции α_p^x и α_p^y вдоль канала инжекции (после согласования).

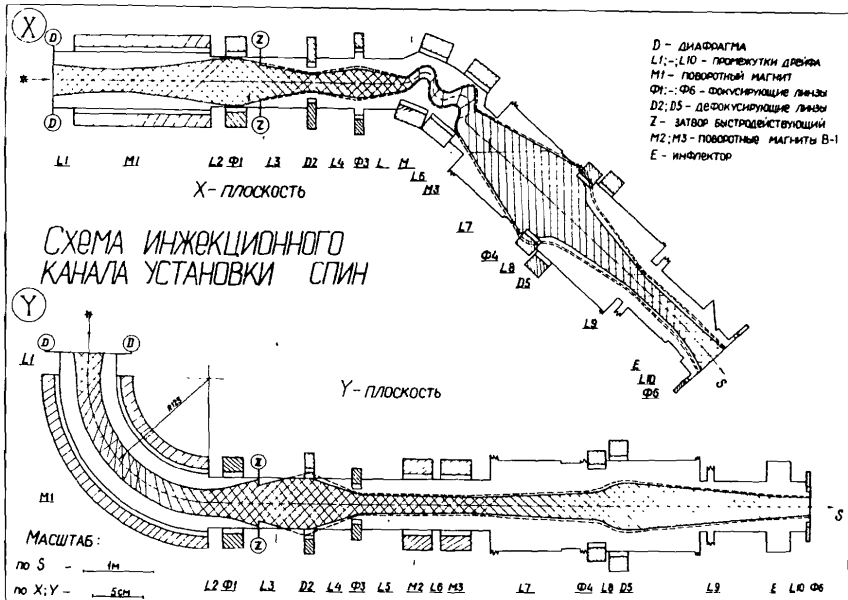


Рис.6. Прохождение пучка протонов через инжекционный канал при начальных параметрах $\alpha_x = \alpha_y = 0,7$.

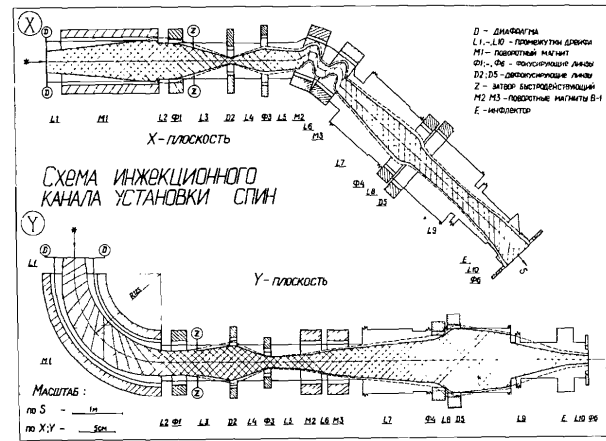


Рис.7. Прохождение пучка протонов через инжекционный канал при начальных параметрах $\alpha_x = \alpha_y = -0,7$.

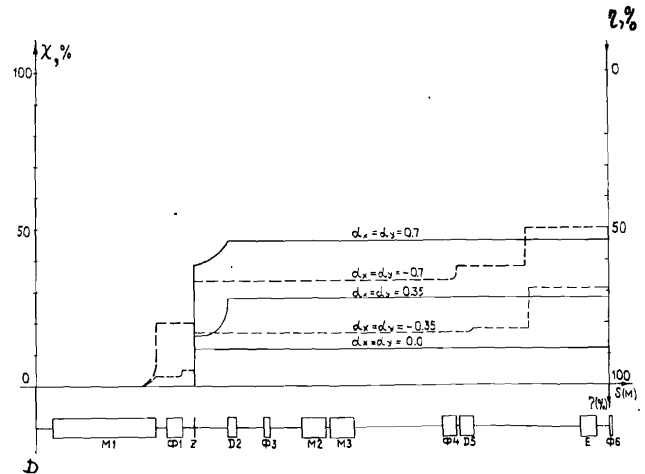


Рис.8. График зависимости потерь $X(s)$ интенсивности пучка по мере его прохождения через инжекционный канал при различных начальных параметрах α_x и α_y , т.е. при различных положениях кроссовера относительно диафрагмы D : $\alpha = 0$ - кроссовер и диафрагма D совпадают, $\alpha < 0$ - кроссовер выше D , $\alpha > 0$ - кроссовер ниже D .

Исследование пучка проводилось при значениях α от $-0,7$ до $+0,7$. При этом L менялось внутри интервала ± 70 см. На рис. 6 и рис. 7 наглядно изображено прохождение пучка протонов через инжекционный канал при начальных условиях $\alpha = \pm 0,7$. Пунктиром изображен пучок без учета оседания на стенках ионопровода. Сравнительное расположение огибающих пучка при α , равных 0 ; $-0,35$ и $-0,7$, показано на рис. 8.

В результате этих исследований были построены кривые (см. рис. 9), показывающие возможные потери интенсивности пучка. Видно, что существенное несовпадение положений кроссовера и диафрагмы D одинаково нежелательно как в случае $\alpha > 0$, так и для $\alpha < 0$. Сравнение суммарных (на выходе канала) потерь интенсивности (до 50% при $\alpha = \pm 0,7$ и до 30% при $\alpha = \pm 0,35$) не позволяет определить знак начальных параметров α и L . Однако если бы существовала возможность измерения тока протонов вдоль всего канала или хотя бы в нескольких местах, например внутри $L4$ и $L7$ (см. рис. 5), то она, несомненно, позволила бы не только определить знак, но и оценить значение α и L из-за достаточно большой разницы в поведении пучка вдоль канала при различных знаках этих величин.

В качестве итоговой рекомендации здесь можно установить допуск на изменение положения кроссовера $L = \pm 30$ см, при котором потери не превысят 20%.

6. РЕЖИМЫ С НЕСООСНОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ ПУЧКА, ИЗВЛЕКАЕМОГО ИЗ ФОРИНЖЕКТОРА

Эти режимы возникают в случае, когда ось пучка, извлекаемого из форинжектора, не совпадает с центром диафрагмы D , а отклоняется от него на расстояние $r = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2}$. В предельном случае X_0 или Y_0 равны $\pm 1,45$ см, т.е. ось пучка попадает на край диафрагмы D . Углы отклонения оси пучка X'_0 и Y'_0 определялись исходя из реальных размеров форинжектора.

В результате проведенных расчетов можно сделать вывод, что даже значительные отклонения пучка ($x_0 = \pm 0,725$ см и $x'_0 = \pm 3,6$ мрад) не приводят к значительным потерям пучка в x -плоскости канала (см. рис. 10 и рис. 11), достигая здесь не более 32%. Для $x'_0 = \pm 7$ мрад потери частиц составляют уже $\sim 90\%$, в основном на диафрагме D и линзе $D2$. Отметим, что существует известная симметрия в поведении пучка при углах отклонения разных знаков для X -плоскости.

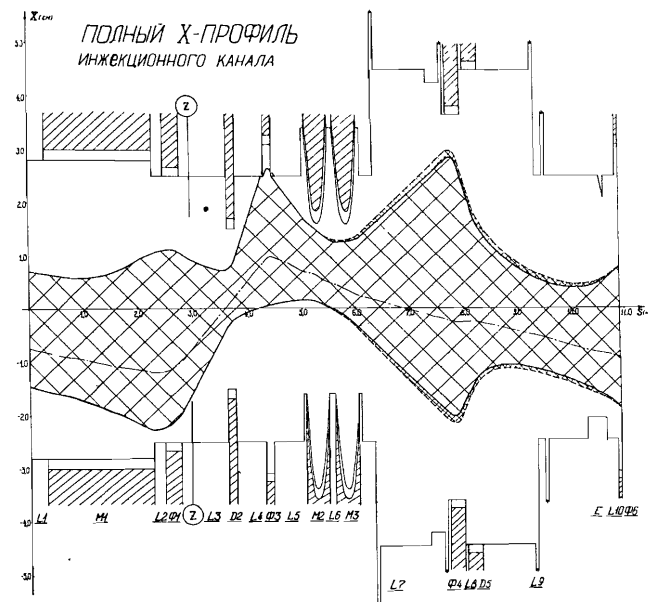


Рис. 9. Пучок протонов в инжекционном канале при начальном положении центра пучка $X_0 = -0,725$ см и $X'_0 = -0,0036$ рад.

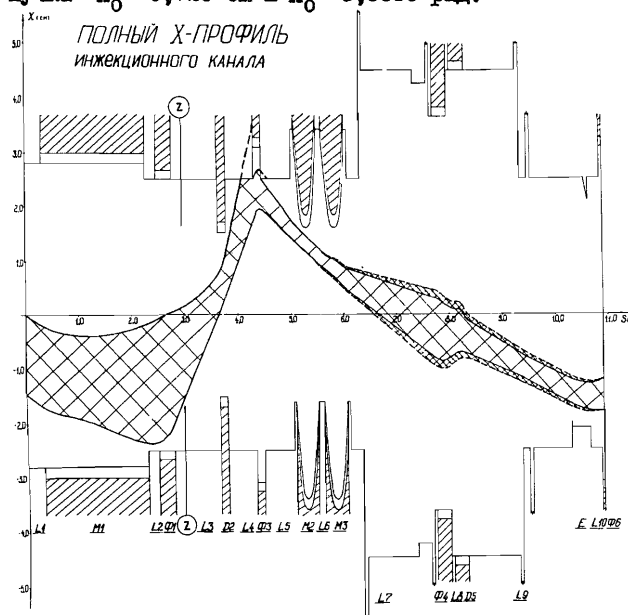


Рис. 10. Пучок протонов в инжекционном канале при начальном положении центра пучка $X_0 = -1,45$ см и $X'_0 = -0,00725$ рад.

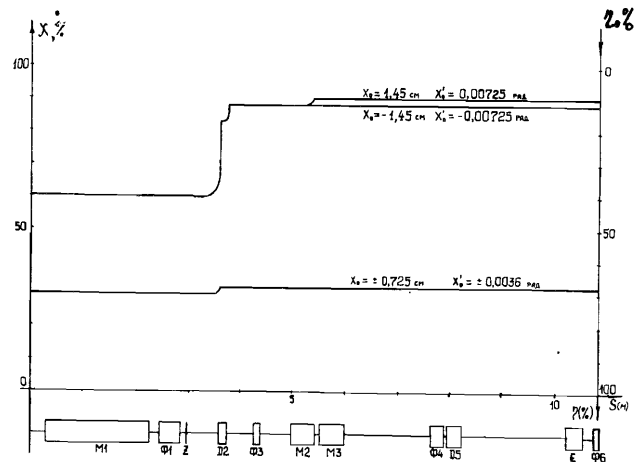


Рис. 11. Графики зависимости потерь $X(S)$ интенсивности пучка протонов вдоль инжекционного канала при различных фазовых координатах (x_0, x'_0) центра пучка в X -плоскости.

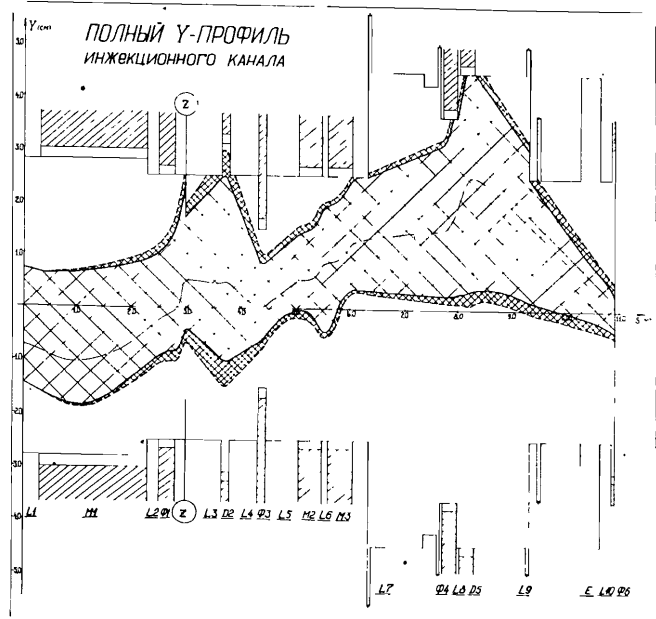


Рис. 12. Пучок протонов в инжекционном канале при начальном положении центра пучка $y_0 = -0,725$ см и $y'_0 = -0,0036$ рад. Дополнительной штриховкой выделено уширение пучка за счет разброса по импульсам $\Delta p/p = \pm 1 \cdot 10^{-3}$.

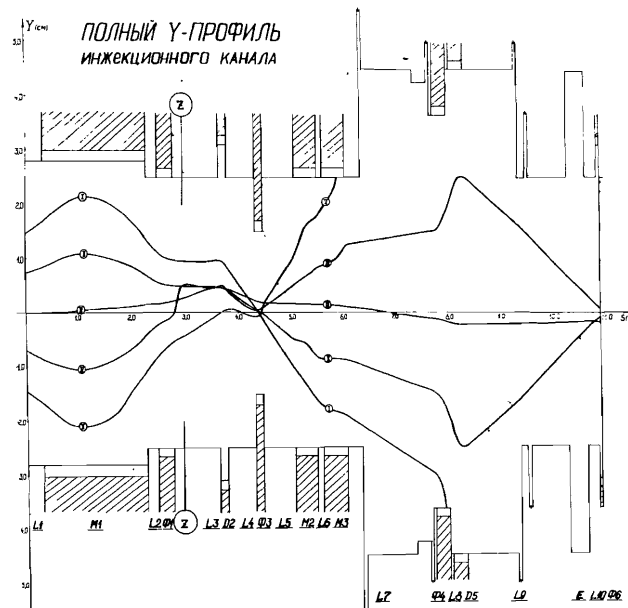


Рис. 13. Взаимное расположение осевых линий (координат центра) пучка при различных режимах инжекции в синхротрон (Y -плоскость): I) $y_0 = 1,45$ см и $y'_0 = 0,00725$ рад, II) $y_0 = 0,725$ см и $y'_0 = 0,0036$ рад, III) $y_0 = y'_0 = 0$, IV) $y_0 = -0,725$ см и $y'_0 = -0,0036$ рад, V) $y_0 = -1,45$ см и $y'_0 = -0,00725$ рад.

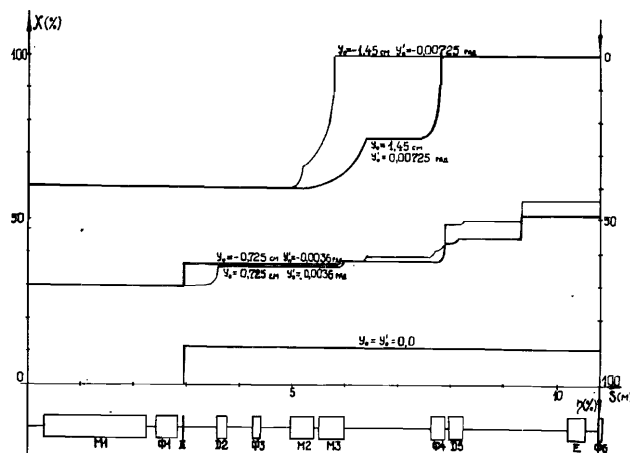


Рис. 14. Графики зависимости потерь X интенсивности пучка вдоль канала инжекции для различных начальных фазовых координат (y_0, y'_0) центра пучка в y -плоскости.

Совершенно иная, несимметричная картина наблюдается в Y -плоскости. Потери частиц достигают $51 \pm 56\%$ уже при $Y'_0 \approx \pm 3$ мрад (в основном на затворе Z и линзе $\Phi 4$), причем пучок полностью исчезает при $Y'_0 \approx \pm 7$ мрад, высаяваясь в основном на линзе $\Phi 4$ и магните $M3$ (см. рис. I2, (см. рис. I2, I3 и I4).

Режимы с несоосной инжекцией особенно нежелательны в y -плоскости. Разумно допустимыми углами оси инжекции пучка могут быть углы X'_0 и Y'_0 , по крайней мере меньшие, чем 3 мрад.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены экспериментальные данные о потерях интенсивности пучка протонов в режиме инжекции пучка при "теплом" и "холодном" запуске сверхпроводящего синхротрона СПИН. Численное моделирование наиболее характерных рабочих режимов инжекционного канала показало хорошее совпадение численных оценок потерь частиц с данными эксперимента. Однако большая величина этих потерь потребовала модификации конструкции и параметров канала на основе выбора оптимального режима эксплуатации ускорителя. С этой целью численно проведено согласование фазового объема инжектируемого и захватываемого в режим ускорения пучка. Полученные параметры согласованного канала приведены в таблице 2. С целью выявления причин потерь частиц в таком согласованном канале и возможности их устранения численно промоделированы режимы работы канала с импульсным разбросом частиц в пучке, режимы работы с различным положением кроссовера пучка относительно места входа пучка в канал и режимы с несоосной инжекцией пучка, извлекаемого из форинжектора.

Полученная информация о допусках на параметры, определяющие работу этих режимов, позволит более оптимально эксплуатировать исследуемый инжекционный канал. Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что при выполнении рекомендаций, сделанных в настоящей работе, интенсивность пучка, инжектируемого в кольцо ускорителя, можно существенно увеличить.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шелаев И.А. и др. ОИЯИ, Р9-83-582, Дубна, 1983.
2. Матюшевский Е.А., Шелаев И.А., Юдин И.П. ОИЯИ, Р9-83-817, Дубна, 1983.

3. Электрофизическая аппаратура промышленного изготовления. Справочник. М., Гос. изд-во литературы по науке и технике ГКАЭ СССР, 1963 г.
4. Юдин И.П. ОИЯИ, Р9-86-601, Дубна, 1986.
5. Бенфорд А. Транспортировка пучков заряженных частиц. М., Атомиздат, 1969.
6. Антонов Ю.Н. и др. 600-киловольтный инжектор протонов для линейного ускорителя. Препринт ОИЯИ, Р-346, Дубна, 1959.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 октября 1987 года.

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

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

Андреев В.В. и др.

P9-87-763

Оценка потерь интенсивности пучка протонов в инжекционном канале синхротрона СПИН

Приведены результаты численных и экспериментальных исследований транспортировки пучка протонов с энергией 0,500 МэВ через инжекционный канал сверхпроводящего синхротрона СПИН при различных режимах работы. Дан анализ некоторых результатов "теплого" и "холодного" запусков ускорителя и предложена модификация конструкции и параметров канала на основе выбора оптимального режима эксплуатации установки. Путем численного моделирования установлена возможность существенного увеличения интенсивности пучка на входе в кольцо синхротрона.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Andreev V.V. et al.

P9-87-763

Proton Beam Loss Evaluation in the Injection Channel of SPIN Synchrotron

Numerical and experimental results of investigation of the 0.5 MeV proton beam transport through the SPIN superconducting synchrotron injection channel are presented for various regimes of operation. Analysis of some results of the "warm" and "cold" startups of the accelerator is given. Some modification of construction and channel parameters by choosing an optimal installation operation regime is proposed. A possibility of increasing the beam intensity at the entrance into the synchrotron ring is established by a computer simulation.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987