

сообщения  
Объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
Дубна

942/2-80

3/3-80

P9 - 12832

Н.Л.Заплатин, С.И.Чеснова

ВАРИАНТ  
ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ИНЖЕКЦИИ ПУЧКА  
В СУПЕРЦИКЛОТРОН

1979

Заплатин Н.Л., Чеснова С.И.

P9 - 12832

Вариант транспортной системы инжекции пучка  
в суперциклотрон

Приводятся результаты расчета варианта инжекции пучка протонов, когда линейный ускоритель находится выше секторов магнитной системы суперциклотрона. Система транспортировки инжектируемого пучка рассчитывалась по линейной теории с использованием программы TRANSPORT. Исследовалось влияние пространственного заряда на параметры тракта. Пучок аппроксимировался совокупностью равномерно заряженных эллиптических цилиндров. Уравнения огибающих пучка /уравнения Владимирского-Капчинского/ интегрировались численно на ЭВМ. Расчеты показали, что при эмиттансе пучка  $\epsilon = 0,5 \pi$  см.мрад и токе 100 мА размеры огибающих в системе транспортировки не превышают 4 см, зазоры в магнитах составляют  $\sim 2 \div 3$  см.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Zaplatin N.L., Chesnova S.I.

P9 - 12832

A Beam Transport Line for Proton Beam Injection  
to the Supercyclotron

The results of calculating the beam transport line for proton injection to supercyclotron with the LINAC positioned above the magnetic system are presented. The beam optics were calculated by using the linear theory and TRANSPORT computer program. Space charge effects on the channel parameters were studied. The beam was approximated as a totality of elliptical cylinders with a uniform charge distribution. Beam envelope equations (Vladimirski-Karpinski equations) were numerically solved by computer program. The calculations indicated that for the proton current of 100 mA and emittance  $0,5 \pi$  cm.mrad the envelope is not more than 4 cm, the magnet gaps are  $\sim (2 \div 3)$  cm.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

ВВЕДЕНИЕ

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ проводится научно-исследовательская работа по сильноточным циклическим ускорителям с энергией до 1 ГэВ. Результатом этой работы явилось предложение о создании суперциклотрона с жесткой фокусировкой на энергию протонов  $\sim 800$  МэВ при интенсивности пучка вплоть до 100 мА<sup>1/</sup>. В качестве инжектора предполагается использовать линейный ускоритель с высокочастотной квадрупольной фокусировкой, работающий при частоте 50 МГц<sup>2/</sup>. Основные параметры пучка на выходе из линейного ускорителя следующие<sup>3/</sup>: энергия и ток протонов  $W_p = 50$  МэВ,  $I_p = 100$  мА, нормализованный эмиттанс /в единицах  $\beta \cdot x \cdot \frac{dx}{dt}$  /  $F_x = F_y = 0,5 \div 1$  см.мрад, разброс по импульсам  $+0,3\%$ , фазовая длина сгустка  $\sim 0,5$  рад, длина  $\sim 15,3$  см.

В настоящей работе рассматривается вариант инжекции пучка протонов, в котором линейный ускоритель находится выше секторов магнитной системы циклотрона. Пучок проводится квадрупольными элементами до вертикальной оси магнитной системы, а затем двумя 90-градусными магнитами транспортируется в медианную плоскость и далее вводится поворотным магнитом и электростатическим инфлектором в камеру ускорителя.

ВЫБОР И ОПТИМИЗАЦИЯ  
ПАРАМЕТРОВ ТРАКТА  
ИНЖЕКЦИИ

При проектировании ионно-оптических систем транспортировки пучков обычно используют минимально возможное число элементов в тракте, стандартные квадрупольные и простые по конструкции магниты с малой апертурой. Все вышеизложенные принципы были положены в основу предлагаемого варианта транспортировки пучка от инжектора до кольцевого ускорителя. Показанная на рис. 1 ионно-оптическая система состоит из трех основных частей, имеющих различное назначение. На первом участке проводка пучка до магнита М1 осуществляется триплетами Т1, Т2, Т3. Второй



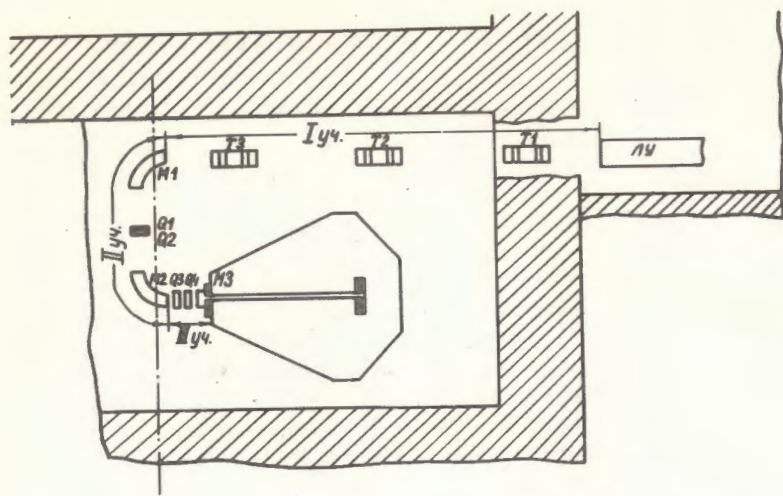


Рис. 1. Схема инъекции пучка в кольцевой циклотрон.

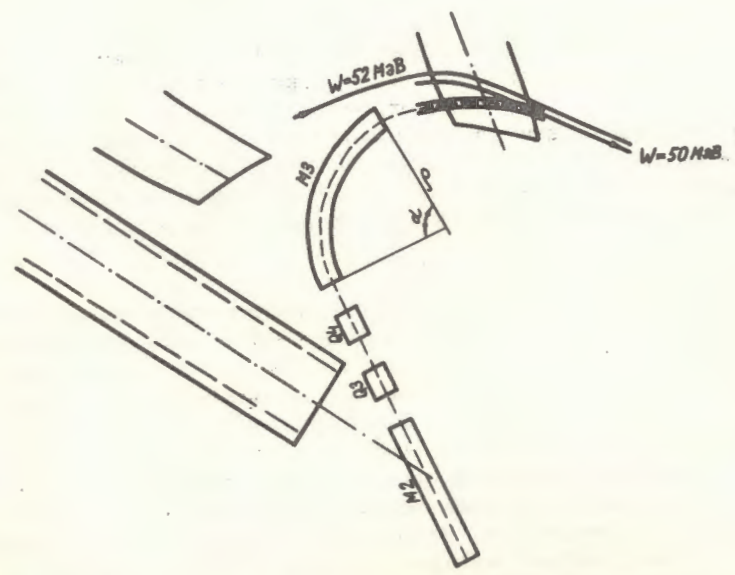


Рис. 2. Схема тракта инъекции в центральной области супер-циклотрона.

участок - симметричная система из двух магнитов M1, M2 и дублета Q1Q2 - предназначена для перевода пучка в меридианную плоскость ускорителя. Третий участок, состоящий из магнита M3 и дублета Q3Q4, находится в центральной области кольцевого циклотрона /рис. 2/ и является наиболее важным в системе, так как служит для поворота пучка на вход инфлектора и согласования фазовых объемов инжектируемых и захватываемых в режим ускорения пучков. Полная длина системы ~ 25 м. Геометрические параметры магнитов - угол поворота  $\alpha$ , радиус кривизны осевой траектории  $\rho$ , а также требуемые при этом индукции поля  $B$  - приведены в таблице.

Таблица

Магниты	$\alpha$ /град/	$\rho$ /м/	$B$ /кГс/
M1	90	1	10,3455
M2	90	1	10,3455
M3	85	0,8	12,932

Для того, чтобы оценить требования к формированию пучка третьим участком тракта, были проведены расчеты траекторий в зоне инъекции в целях определения пропускной способности инфлектора. В этих расчетах использовалось распределение поля, полученное на модели магнитной системы суперциклотрона в масштабе 1:15<sup>4/</sup>. Расстояние между соседними орбитами частиц в циклотроне при наборе энергии ~ 2 МэВ за оборот составляет ~ 4 см, что достаточно для обхода пластины инфлектора. Для выбранной схемы проводки угол между осью инжектируемого пучка и равновесной орбитой при энергии  $W = 50$  МэВ составляет ~ 15°. Оценки показывают, что для поворота пучка на равновесную орбиту необходима напряженность электрического поля ~ 75 кВ/см при длине инфлектора ~ 100 см. Если выбрать расстояние между пластинами /1,5±2/ см, то такой инфлектор способен пропустить пучок с радиальной расходимостью ~ /15 ± 20/ мрад.

Система транспортировки инжектируемого пучка рассчитывалась по линейной теории<sup>5/</sup> с использованием программы TRANSPORT<sup>6/</sup>. Для области инъекции, где влияние краевого поля становится значительным, проводились расчеты траекторий на ЭВМ по точным уравнениям движения. В качестве исходного использовался пучок с эмиттансом  $\epsilon_x = \epsilon_y = 0,5 \cdot \pi \cdot \text{см} \cdot \text{мрад}$  /рис. 3/. Форма

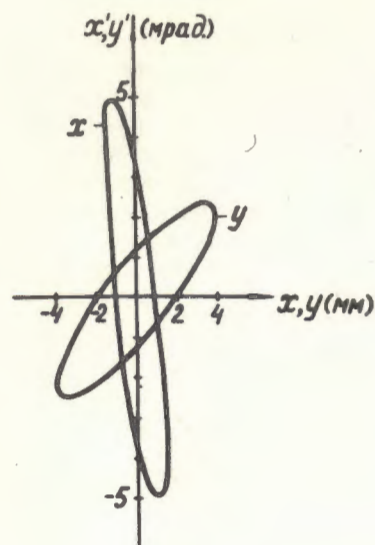


Рис. 3. Эмиттанс инжектируемого пучка.

выбранных эллипсов подобна полученным экспериментально на выходе линейного ускорителя с квадрупольной высокочастотной фокусировкой УРАЛ-15, представляющего собой начальную часть инжектора для бустера протонного синхротрона ИФВЭ<sup>/7,8/</sup>. Расчеты по оптимизации тракта инжекции привели к системе, показанной на рис. 4 /  $r_x, r_y$  - радиальные и аксиальные огибающие пучка в криволинейной системе координат  $X, Y, S$  с началом на выходе линейного ускорителя/. Фокусировка пучка на вход магнита M1 триплетами первого участка обеспечивает малые размеры огибающих в магнитах /  $\sim 2$  см/. При этом градиенты квадрупольных магнитов не превышают 0,5 кГс/см. На втором участке пучок проводится магнитами M1, M2 с однородным полем и квадрупольным дублетом Q1Q2, работающим как вертикально-фокусирующая линза с градиентом 0,2 кГс/см. Отклонение пучка и формирование его на входе инфлектора осуществляется на последнем участке тракта длиной  $\sim 3$  м, где применение дублета Q3Q4 с градиентами поля  $\sim 1,0$  кГс/см позволяет скомпенсировать влияние рассеянного поля ускорителя и получить пучок на входе в инфлектор с размерами  $2r_x = 0,7$  см и  $2r_y = 0,8$  см и расходимостями  $2r'_x = 7$  мрад и  $2r'_y = 8$  мрад /рис. 4б/. Увеличение размера пучка в конце системы, обусловленное линейной дисперсией магнитов, составляет в среднем 40%.

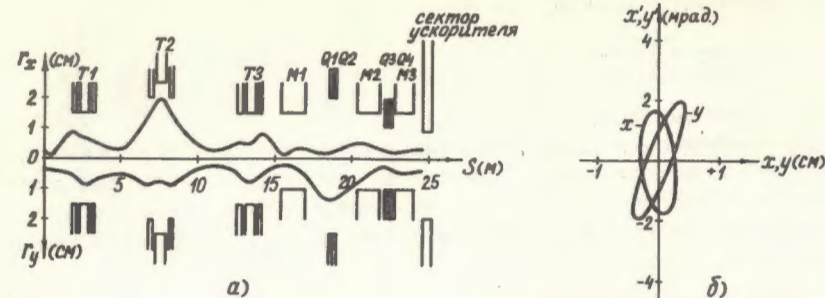


Рис. 4. Огибающие и фазовые эллипсы на конце тракта при  $I_p = 0$ .

Для сильноточных пучков при проектировании транспортных систем необходимо учитывать эффекты пространственного заряда. Учет электрического потенциала собственного поля сгустка в пренебрежении его магнитным полем приводит к следующей системе уравнений движения частиц<sup>/9/</sup>:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = - \frac{eV}{m_0 \gamma} \cdot B_y(x, y, z) - \frac{e}{m_0 \gamma^3} \cdot \frac{\partial U}{\partial x}, \quad (1)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{eV}{m_0 \gamma} B_x(x, y, z) - \frac{e}{m_0 \gamma^3} \cdot \frac{\partial U}{\partial y},$$

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = - \frac{e}{m_0 \gamma^3} \cdot \frac{\partial U}{\partial z}.$$

В работе<sup>/10/</sup> было показано, что если аппроксимировать пучок совокупностью равномерно заряженных эллипсоидов с полуосями  $r_x, r_y, l$ , то вплоть до  $r_x/l = 0,5; r_y/l = 0,5$  поперечные компоненты собственного поля пучка будут слабо зависеть от длины сгустка. В рассматриваемом случае для инжектируемого пучка  $r_x/l = 0,15; r_y/l = 0,1$ . В этом случае можно представить пучок в виде бесконечно длинного эллиптического цилиндра с потенциалом

$$U(x, y) = - \frac{2\pi \rho_0}{r_x + r_y} (r_y x^2 + r_x y^2). \quad (2)$$



где плотность заряда

$$\rho_0 = \frac{eI}{\pi\beta c y r_x r_y}$$

/ I - пиковый ток/.

В приближении линейной зависимости внешних сил  $K(s) \cdot x$  и  $K(s) \cdot y$  от поперечных размеров, что имеет место для элементов ионно-оптических систем с достаточной точностью, уравнения движения в криволинейной системе координат принимают вид:

$$\frac{d^2x}{ds^2} + [K_x(s) - G_y(s)] \cdot x = 0,$$

$$\frac{d^2y}{ds^2} + [K_y(s) - G_x(s)] \cdot y = 0,$$

/3/

где  $G_x(s) \cdot x = \frac{g}{r_x(r_x + r_y)}$ ,  $G_y(s) \cdot y = \frac{g}{r_y(r_y + r_x)}$  - дефокусирующие

силы кулоновского расталкивания в каждом сечении пучка,

$g = \frac{4I}{\beta y I_0}$ ,  $I_0 = 3,14 \cdot 10^7$  А /для протонов/.

Для расчета огибающих пучка  $r_x$  и  $r_y$  из уравнений /3/ могут быть получены уравнения типа Владимирского-Капчинского /11/:

$$\frac{d^2r_x}{ds^2} + K_x(s)r_x - \frac{g}{r_x + r_y} - \frac{\epsilon_x^2}{r_x^3} = 0,$$

$$\frac{d^2r_y}{ds^2} + K_y(s)r_y - \frac{g}{r_x + r_y} - \frac{\epsilon_y^2}{r_y^3} = 0.$$

Последние уравнения численно интегрировались на ЭВМ в целях анализа влияния пространственного заряда на параметры пучка. Расчеты показали, что для исследуемого пучка с током протонов  $I_p = 100$  мА /пиковый ток  $I = 1,3$  А/ дефокусировка от пространственного заряда значительна и составляет ~20% от средней величины фокусирующей силы в тракте, что приводит к большим отклонениям от огибающих, рассчитанных для нулевого тока, к передвижению кроссоверов, увеличению требуемой апертуры элементов и рассогласованию пучка /рис. 5/. Для компенсации влияния эффектов пространственного заряда, как показали расчеты, необходимо увеличить жесткость фокусировки в системе. На первом участке тракта в заново согласованной системе /рис. 6/ это достигается увеличением

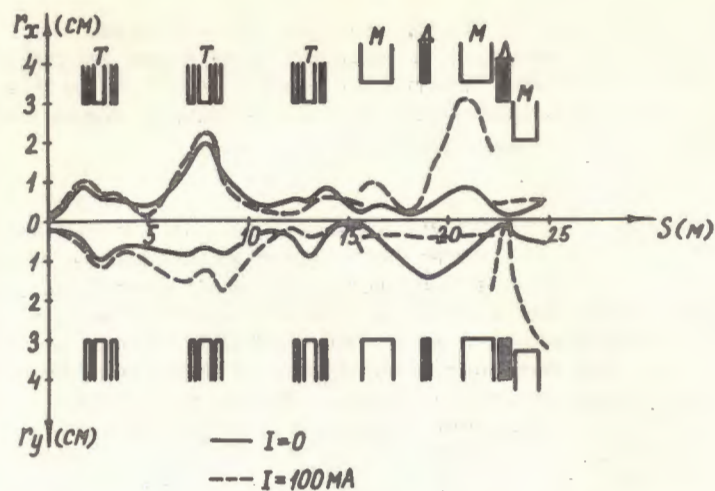


Рис. 5. Пример рассогласования в системе при учете пространственного заряда.

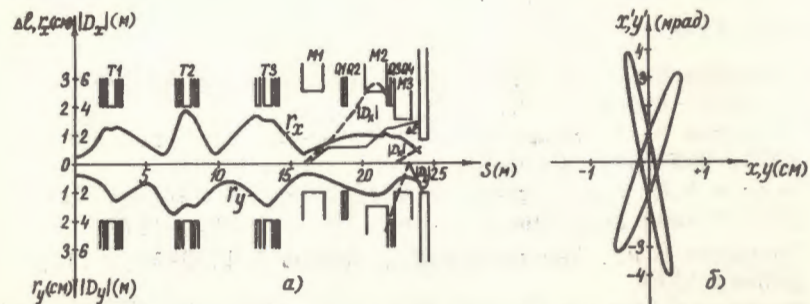


Рис. 6. Огибающие, дисперсия, удлинение сгустка и фазовые эллипсы на конце согласованной системы при  $I_p = 100$  мА.

градиентов квадруполь в триплетах в среднем на 40%, на втором и третьем участках эффективным оказалось введение градиентной фокусировки в магнитах M1, M2 ( $n = 0,5$ ) и знакопеременного слабофокусирующего градиента в M3. Величины огибающих в системе транспортировки увеличиваются при этом в среднем на 15%. Как показано на рис. 6б, в конце тракта сформирован пучок с размерами  $2r_x = 0,8$  см,  $2r_y = 1,2$  см /дисперсия  $|D_x| = 1$  м и  $|D_y| = 2$  м увеличивает эти размеры

на 0,3 и 0,6 см/ и расходимостями  $2\gamma'_x = 8$  мрад,  $2\gamma'_y = 6,5$  мрад, что находится в пределах пропускной способности инфлектора. Удлинение сгустка составляет  $\Delta l \approx 4$  см и может быть скомпенсировано постановкой дебанчера перед магнитом M1.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученная система транспортировки может быть одним из возможных вариантов проводки пучка от инжектора до суперциклотрона. При эмиттансе пучка  $\epsilon \approx 0,5 \pi \cdot \text{см} \cdot \text{мрад}$  и токе 100 мА размеры огибающих в системе транспортировки не превышают 4 см, что позволит использовать стандартные мало-апертурные квадрупольные элементы. Зазоры в магнитах составляют  $\sim 2/3$  см, поэтому ампервитки в них достигают разумной величины.

Исследование влияния пространственного заряда на параметры тракта показало, что величина дефокусирующей силы кулоновского расталкивания составляет  $\sim 20\%$  от средней величины фокусирующей силы и может быть скомпенсирована увеличением жесткости в системе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Джелепов В.П., Дмитриевский В.П., Кольга В.В. ОИЯИ, Р9-9066, Дубна, 1975.
2. Тепляков В.А., Мальцев А.П., Степанов В.Б. Препринт ИФВЭ, ИНЖ-69-2, Серпухов, 1969.
3. Глазов А.А. и др. Труды V Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1977.
4. Заплатин Н.Л., Самсонов Е.В., Чеснов А.Ф. ОИЯИ, -11533, Дубна, 1978.
5. Штеффен К. Оптика пучков высокой энергии. "Мир", М., 1969.
6. Brown K.K., Howry S.K. SLAC-91, 1970.
7. Горшков Б.М. и др. Препринт ИФВЭ, ИНЖ 76-139, Серпухов, 1976.
8. Голосай Н.И. и др. АЭ, 1975, т.39, вып.2, с. 123-125.
9. Капчинский И.М. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях. Атомиздат, М., 1966.
10. Власов А.Д. Теория линейных ускорителей. Атомиздат, М., 1965.
11. Karchinsky I.M., Vladimirskij V.V. In: Int. Conf. on High Energy Accel. and Instrum. CERN, 1959, p.274.

Рукопись поступила в издательский отдел  
3 октября 1979 года.