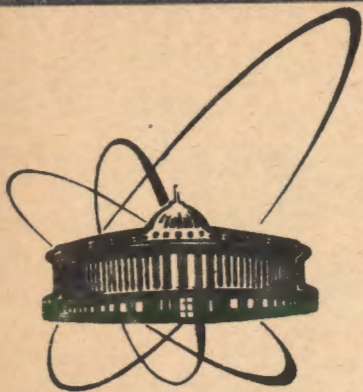


90-538



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

1019/91

P9-90-538

А.Боркова*, В.П.Дмитриевский, Я.Иван*,
Д.В.Павлов, З.Трейбал*, А.Ф.Чеснов,
С.И.Чеснова

СИСТЕМА РАЗВОДКИ ПУЧКОВ ЦИКЛОТРОНА
У-120К

*Институт ядерной физики ЧСАН, Ржеж

1990

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ разрабатывается проект изохронного циклотрона У-120К для Республики Куба. Ближайшим аналогом для данного ускорителя является изохронный циклотрон У-120М^{1/1} (ИЯФ ЧСАН, Ржеж), для которого имеются в полном объеме конструкторские разработки и накоплен опыт 12-летней эксплуатации. У-120К предназначен для фундаментальных исследований в области ядерной физики и работ прикладного характера. Ожидаемые параметры пучков ускоренных ионов на выходе из ускорителя приведены в таблице.

Таблица

Тип ионов	Энергия, МэВ	Ток, мкА	Монохроматичность	Эмиттансы (π мм мрад)	
				горизонтальный	вертикальный
$^1\text{H}^+$	11-40	70-100	6×10^{-3}	57	34
H_2^+	6-17	70-100	6×10^{-3}	57	34
$^4\text{H}^{++}$	11-35	30-70	6×10^{-3}	57	34
$^3\text{H}^{++}$	15-45	30-70	6×10^{-3}	57	34

В данной работе представлены результаты расчета ионно-оптической системы транспортировки пучков циклотрона У-120К.

Система разводки пучков ускоренных ионов (рис.1) состоит из участков А, В, С, D, Е, F и включает 6 каналов, начинающихся от коллиматора F1, до мест расположения физических мишеней. Участок А является общим для всех каналов и состоит из корректирующих магнитов и двух квадрупольных дублетов. Разводящий магнит SM отклоняет пучки ионов на углы: 0° ; $\pm 22,5^\circ$ и $\pm 45^\circ$, соответственно. Требования к формированию пучков фокусирующими элементами обусловлены их назначением. Трассы А-В и А-С предназначены для наработки радио-

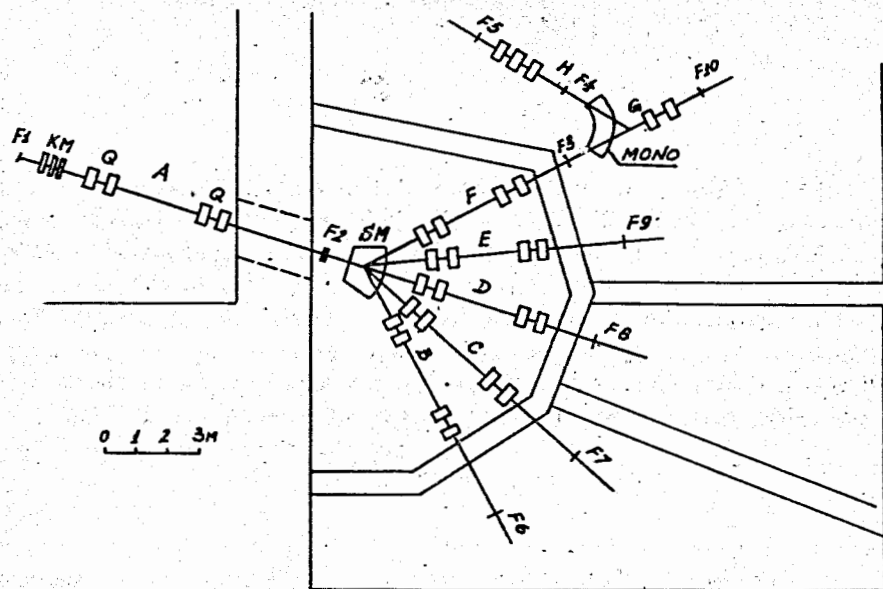


Рис.1. Общая схема разводки пучков.

изотопов (^{67}Ga , ^{111}In , ^{123}J , ^{201}Tl), А-Д — для биомедицинских целей, А-Е — для ядерной спектроскопии, А-Г и А-Н — для физических исследований. Общими требованиями для всех каналов являются проводка ионов без потерь с минимальным количеством оптических элементов и получение сфокусированных пучков в местах расположения мишеней и коллимирующих щелей.

Выбор и оптимизация параметров системы транспортировки проводилась с помощью вычислительных программ TRANSPORT^{1/2/}, ELLIPS, ACSEPTANS и CHARGE. Все программы поставлены на ПЭВМ и модифицированы для работы с графическим пакетом файлов. Программа ELLIPS рассчитывает фазовое изображение пучка вдоль тракта транспортировки по известной матрице корреляции. С помощью программы ACSEPTANS определяется аксептанс системы по выбранным геометрическим апертурам элементов тракта. Для оценки влияния пространственного заряда используется программа CHARGE. Расчет системы разводки пучков проводился для протонов максимальной энергии 40 МэВ, представляющих наиболее трудный для фокусировки ионный пучок. В качестве исходных эмиттансов (рис.2) взяты экспериментально измеренные эффективные эмиттансы на выходе из ускорителя У-120М с величинами $\epsilon_x = 57 \pi$ мм мрад и $\epsilon_y = 34 \pi$ мм мрад.

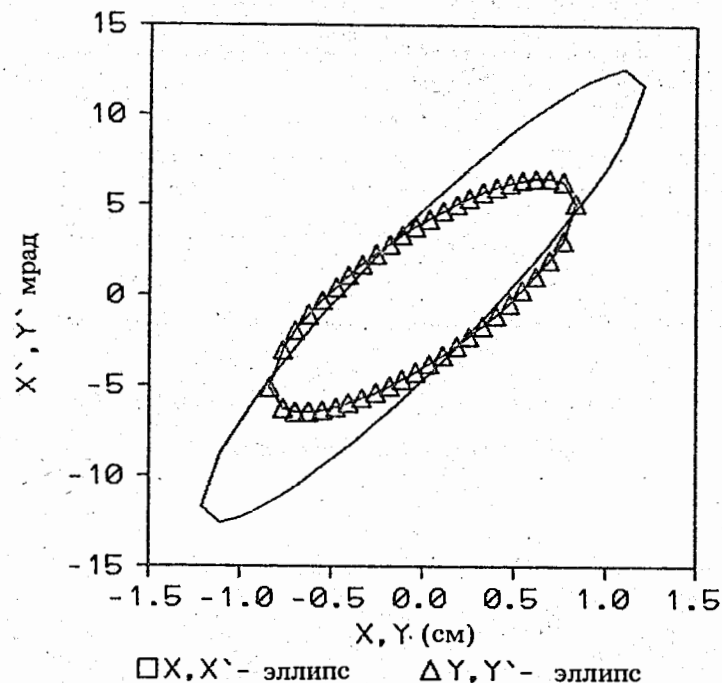


Рис.2. Измеренные эмиттансы пучка, используемые в расчетах.

На рис.3-4 показаны для примера огибающие пучка в трассах А-С и А-Г-Н. Видно, что при оптимальной расстановке квадрупольных элементов могут быть получены размеры пучка на мишенях < 1 см. Расчеты показали, что это справедливо для всех трасс.

В тракте А-Г-Н используется три квадрупольных дублета, с помощью которых можно получить пучок ионов $\sim 1 \times 1$ см (рис.4).

Тракт А-Г-Н предназначен для получения моноэнергетических пучков ионов. Для этих целей используется магнит — монохроматор 'MONO'. Симметричная система (дрейф + MONO + дрейф) переводит пучок из коллиматора F3 в F4 с увеличением, равным единице. Двойная фокусировка достигается скошенными краями магнита ($\beta = 38^\circ$) при общем повороте пучка на угол $\alpha = 115^\circ$. Полная дисперсия в F4 равна $\approx 0,022$ м%. При ширине коллимационной щели 1 мм данная система позволяет улучшить монохроматичность пучка на мишени приблизительно в пять-шесть раз по сравнению с полученным от ускорителя (см. таблицу). Исходя из размеров огибающих пучка выбраны апертуры линз и поворотных магнитов, которые соответственно равны $\varnothing 9$ см и $2h = 9$ см. Расчеты пропускной способности трактов показали, что оп-

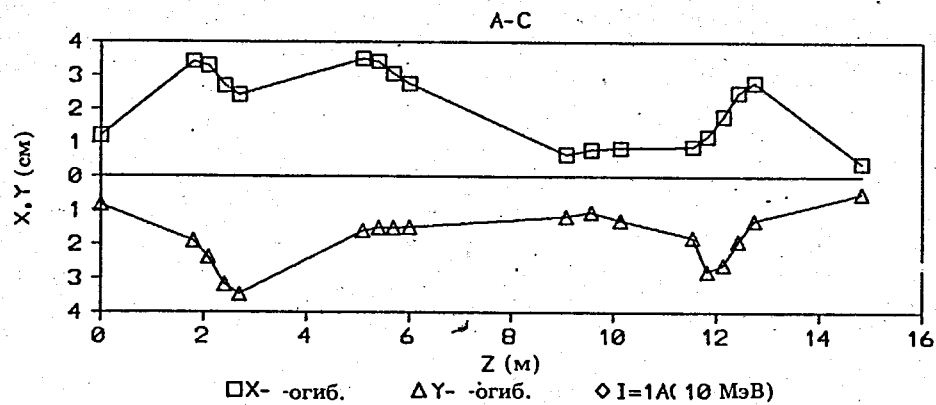


Рис.3. Огибающие пучка трассы А-С.

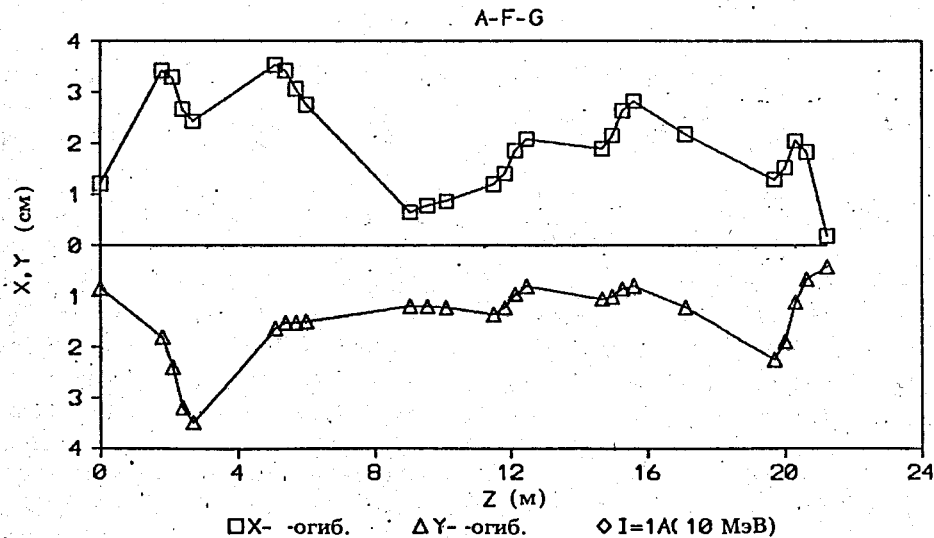


Рис.4. Огибающие пучка трассы А-F-G.

тимальное согласование эмиттанса пучка с аксептансом трактов обеспечивается в случае размещения первого дублета линз на расстоянии 1,2-1,4 м от разводящего магнита.

На рис.5 для примера показано согласование эмиттанса пучка с аксептансом тракта А-D при горизонтальной и вертикальной фокусировке ионов на мишень в точке F8. Видно, что потери пучка отсутствуют,

и определяющим является аксептанс участка за разводящим магнитом. Сравнение эмиттанса пучка с аксептансами трактов показало, что запас по пропускной способности в системе составляет $\approx 20 \div 30 \%$.

Для оценки влияния пространственного заряда на размеры пучка мы исходим из следующего. Известно^{3/}, что если аппроксимировать пучок ионов 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 соответствующего поля пучка будут слабо зависеть от длины сгустка (в этом случае $r/l < 0,17$). Тогда допустимо аппроксимировать пучок в виде бесконечно длинного цилиндра с потенциалом

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

где плотность заряда $\rho_0 = \frac{eI}{\pi\beta c r_x r_y}$, I — пиковый ток, e — заряд электрона, $\beta = v/c$, c — скорость света.

В приближении линейной зависимости внешних сил $K_x(z)$ и $K_y(z)$ от поперечных размеров пучка, что имеет место для элементов системы транспортировки с достаточной точностью, для расчета огибающих справедливы уравнения типа Владимирского — Капчинского^{4/}

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

$$\frac{d^2 r_y}{dz^2} + K_y(z) r_y - \frac{g}{r_x + r_y} - \frac{\epsilon_y^2}{r_y^3} = 0,$$

где ϵ_x, ϵ_y — эмиттансы пучка, $g = \frac{4I}{\beta\gamma I_0}$, $I_0 = 3,14 \times 10^7$ А (для прото-

нов). Уравнения интегрировались на ПЭВМ методом Рунге — Кутты по программе CHARGE для трактов, предварительно оптимизированных с помощью программы TRANSPORT. Расчеты показали, что при токе пучка $I_p = 100$ мкА (пиковый ток порядка 0,01А) существенных изменений в размерах огибающих не наблюдается. Только при увеличении тока пучка приблизительно на два порядка наблюдается изменение размера и мест расположения кроссоверов (рис.6); для энергии 10 МэВ эти изменения уже значительны.

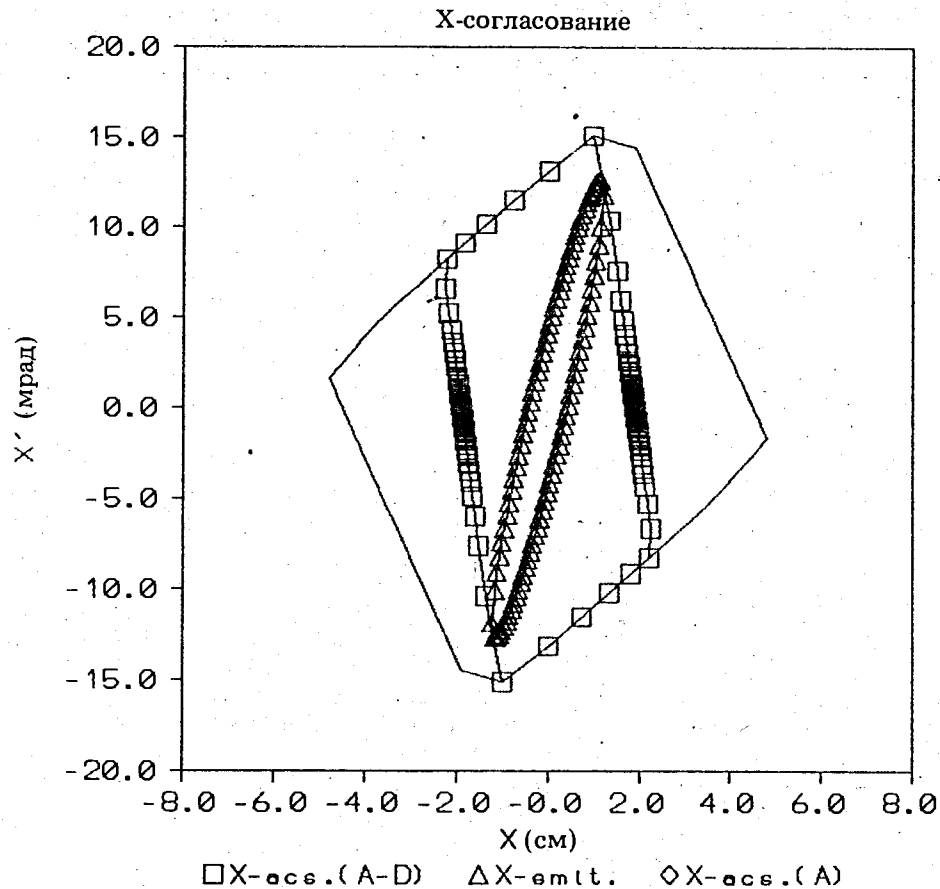


Рис.5а. Пример согласования эмиттанса пучка с акцептансом трассы A-D в горизонтальном направлении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные расчеты позволили выбрать параметры элементов системы транспортировки пучка ускорителя У-120 К:

1. Градиенты линз не превышают величины 7 Тл/м при длине 0,3 м.
2. Размеры пучка во всех трактах не больше 7 см, что позволяет выбрать ионопровод такого же диаметра и использовать одинаковые квадрупольные линзы с апертурой 9 см при максимальном градиенте магнитного поля 8 Тл/м.

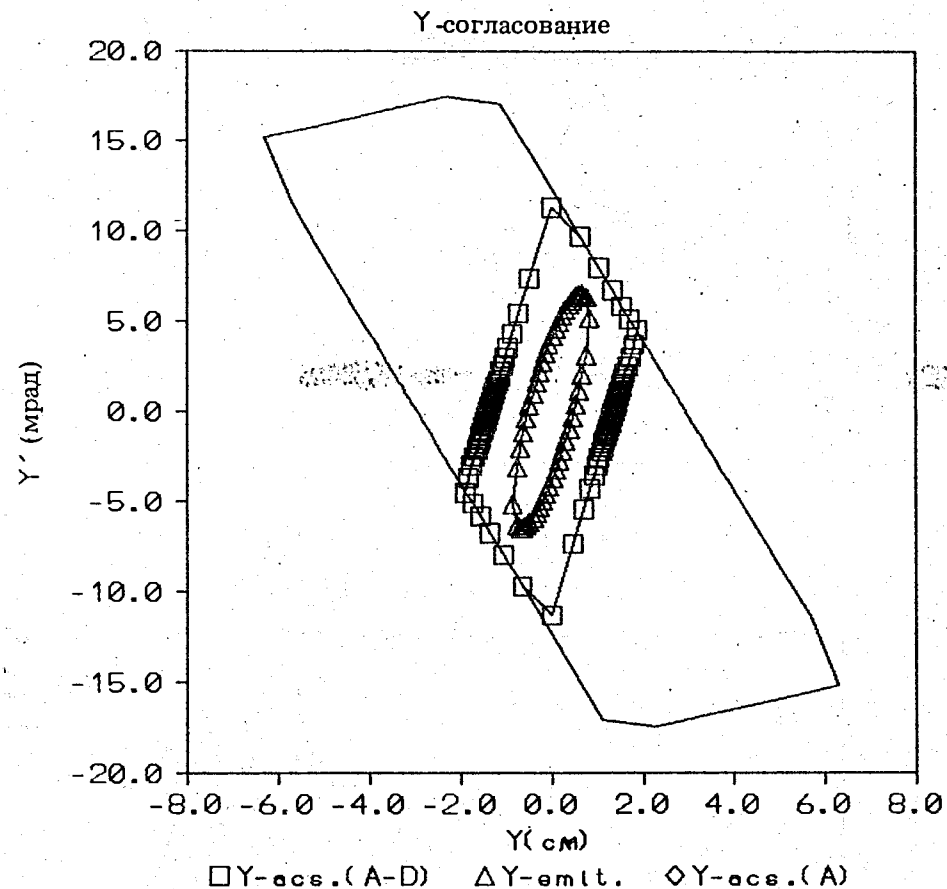


Рис.5б. Пример согласования эмиттанса пучка с акцептансом трассы A-D в вертикальном направлении.

3. Анализ согласования эмиттанса пучка с акцептансами трактов показал, что запас по пропускной способности для оптимальных вариантов транспортировки составляет 20÷30%.

4. Потери интенсивности при анализе пучка в тракте MONO составляют ~ 90% при улучшении разрешения по импульсам приблизительно в пять раз.

5. Наличие пространственного заряда не влияет на транспортировку пучка в трактах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бейшовец В. и др. — В сб.: Международное совещание по циклотронам и их применениям, P9-85-707, Дубна: ОИЯИ, 1986, с.61.
2. Brown K.L., Kear B.K., Howry S.H. — TRANSPORT/360, A Computer Program for Designing Beam Transport Systems. SLAC Report No.91, Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, Stanford, California, 1970.
3. Власов А.Д. — Теория линейных ускорителей. М.: Атомиздат, 1965.
4. Капчинский И.М. — Теория линейных резонансных ускорителей. М.: Энергоиздат, 1982.

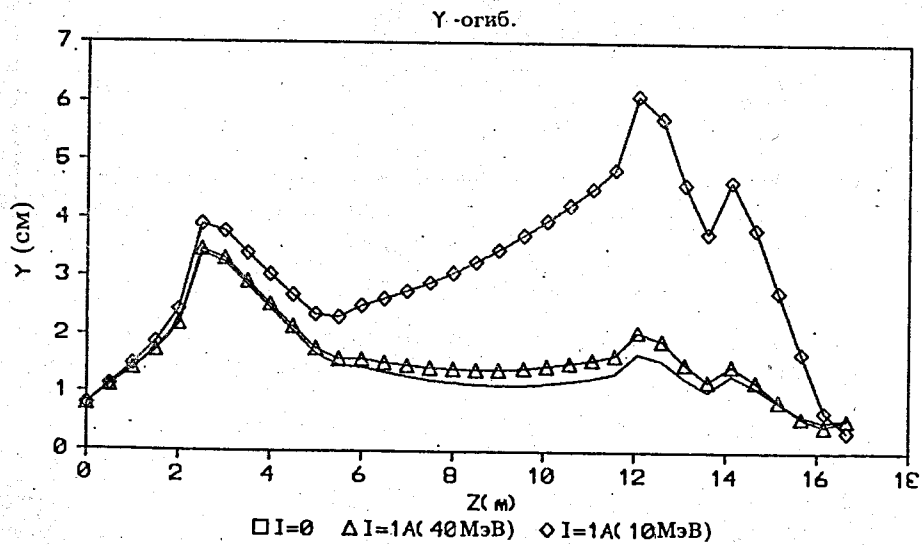
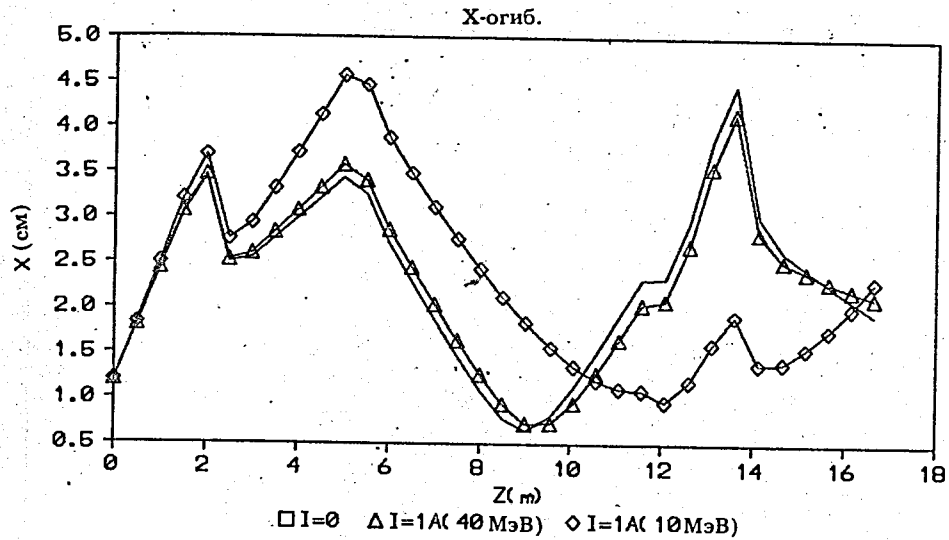


Рис.6. Влияние пространственного заряда на огибающие пучка в трассе А-D при изменении энергии протонов: а) в горизонтальном направлении; б) в вертикальном направлении.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 ноября 1990 года.