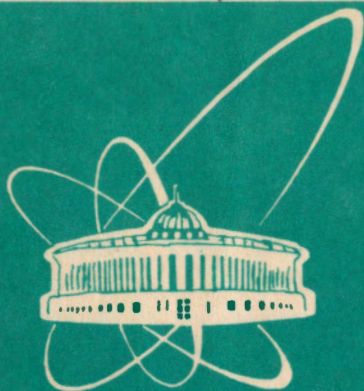


93-59



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

9-93-59

М.Кузмиак, В.С.Александров, Н.И.Балалыкин,
Я.Седлак*

МЕДИЦИНСКИЙ ПРОТОННЫЙ СИНХРОТРОН

*Физический институт, Прага

1993

1. Введение

Основными параметрами медицинского синхротрона являются энергия и интенсивность протонного пучка. Энергия определяется пробегом (~30 см) протонов в ткани больного. Интенсивность пучка определяет скорость набора дозы при облучении. Предполагаемое время облучения - 2 минуты. Установлено ^{/1/}, что энергия протонов должна быть 250 МэВ, а величина среднего тока - 10 нА. Периметр кольца синхротрона выбирается минимальным как для уменьшения стоимости самого ускорителя, так и площади для его размещения.

В Чешской Республике сформировалась группа из врачей-онкологов и физиков, которая предлагает протонный синхротрон для терапии рака. Предполагается, что этот синхротрон будет аналогичен уже работающему синхротрону в Медицинском университетском центре г. Лома Линда (LLUMC) ^{/2/}. В предлагаемой работе рассматривается главным образом магнитная структура слабофокусирующего синхротрона с нулевым градиентом магнитного поля ^{/3,4/}. Рассмотрен также новый способ определения числа оборотов в протонном синхротроне и прироста энергии за оборот.

2. Схема кольца

Магнитная структура предлагаемого специализированного медицинского протонного синхротрона - СМПС (рис. 1) состоит из четырех суперпериодов (П). Каждый суперпериод включает в себя 2 секторных 45-градусных магнита с однородным полем и 2 прямолинейных участка L_1' и L_2 . Вертикальная фокусировка осуществляется краевыми полями магнитов. Для этого кромки полюсных наконечников срезаны под некоторым углом с по отношению к нормали к траектории частицы (рис. 2).

Матрицы перехода одного суперпериода СМПС представим в виде произведения матриц последовательности отдельных участков:

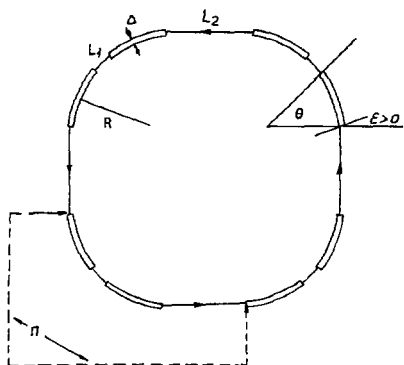


Рис. 1

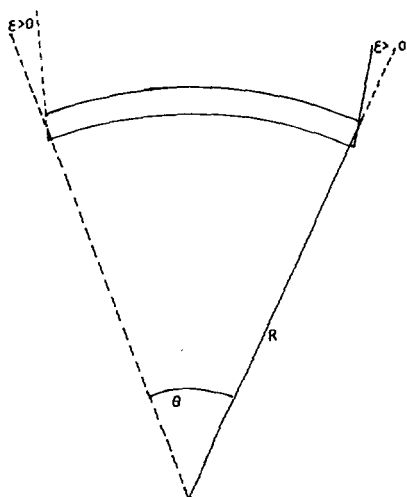


Рис. 2

$$M_{\Pi} = M_{L2} \circ M_B \circ M_{L1} \circ M_B,$$

где M_{L2} и M_{L1} - матрицы прямолинейных промежутков:

$$M_L = \begin{vmatrix} 1 & L & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

а M_B - матрицы перехода симметричного секторного магнита с нулевым градиентом и угловой фокусировкой:

$$\begin{vmatrix} \frac{\cos(\theta-\epsilon)}{\cos \epsilon} & R \cdot \sin \theta & R \cdot (1 - \cos \theta) \\ -\frac{1}{R} \frac{\sin(\theta-2\epsilon)}{\cos^2 \epsilon} & \frac{\cos(\theta-\epsilon)}{\cos \epsilon} & \frac{\sin(\theta-\epsilon) + \sin \epsilon}{\cos \epsilon} \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

для горизонтального движения и

$$\begin{vmatrix} 1 - \theta \cdot \operatorname{tg} \epsilon & \theta \cdot R & 0 \\ -\frac{1}{R} \operatorname{tg} \epsilon (2 - \theta \cdot \operatorname{tg} \epsilon) & 1 - \theta \cdot \operatorname{tg} \epsilon & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

- для вертикального.

Набег фазы бетатронных колебаний на суперпериоде μ определяется из соотношения $\cos \mu = \frac{1}{2}(m_{11} + m_{22})$, где m_{11} и m_{22} - диагональные элементы матрицы перехода суперпериода. Числа бетатронных колебаний за оборот ($Q = N\mu/2\pi$, где N - число суперпериодов) для СМПС имеют следующий вид:

$$Q_y = \frac{2}{\pi} \arccos \left\{ \chi^4 \left[\left(\frac{s}{R} \right)^2 \left(\frac{L1 \circ L2}{R^2} \right) \right] \chi^3 \left[\left(\frac{4s}{R} \right) \left(\frac{L1 \circ L2}{R^2} \right) + \left(\frac{2s^2}{R^2} \right) \left(\frac{L1 + L2}{R} \right) \right] + \chi^2 \left[\frac{4s^2}{R^2} + \frac{L1 \circ L2}{R^2} + \frac{6s}{R} \left(\frac{L1 + L2}{R} \right) \right] - \right. \quad (1)$$

$$\left. - \chi \left[\frac{8s}{R} + 4 \left(\frac{L1 + L2}{R} \right) \right] + 2 \right\} \frac{1}{2};$$

$$\begin{aligned}
Q_h = & \frac{2}{\pi} \arccos \left\{ \chi^4 \left[\frac{L_1 \cdot L_2 \cdot \sin^2 \theta}{R^2} + \chi^3 \left[\frac{4 L_1 \cdot L_2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{R^2} + \right. \right. \right. \\
& + \left. \left. \frac{2(L_1+L_2) \cdot \sin^2 \theta}{R} \right] + \chi^2 \left[-2 \frac{L_1 \cdot L_2 \cdot \sin^2 \theta}{R^2} + 4 \frac{L_1 \cdot L_2 \cdot \cos^2 \theta}{R^2} + \right. \right. \\
& + \left. \frac{6 \sin \theta \cdot \cos \theta}{R} (L_1+L_2) + 4 \sin^2 \theta \right\} + \chi \left[8 \sin \theta \cdot \cos \theta + \right. \quad (2) \\
& + \left. \frac{2(L_1+L_2) \cdot (2 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta)}{R} - \frac{4 L_1 \cdot L_2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{R^2} \right] + \\
& + \left[\frac{L_1 \cdot L_2 \cdot \sin^2 \theta}{R^2} - \frac{2 \sin \theta \cdot \cos \theta}{R} (L_1+L_2) + 2 \cos 2\theta \right] \frac{1}{2} .
\end{aligned}$$

где $\chi = \operatorname{tg} \epsilon$, а $s = R \cdot \theta$.

Характерной особенностью протонных синхротронов является наличие длинных прямолинейных промежутков, которые используются для размещения устройств ввода - вывода частиц и ускоряющих станций. Длина малого промежутка L_1 определяется требованием размещения между поворотными магнитами дефокусирующего квадруполя, который будет использоваться для вывода протонов из ускорителя. На рис.3 показаны зависимости Q_v и Q_h от угла ϵ , рассчитанные по формулам (1) и (2) для выбранных значений $L_1 = 0.5$ м, $L_2 = 2.0$ м, $R = 1.6$ м, $\theta = 45^\circ$.

На рис.4 изображена рабочая клетка ускорителя. Предполагается, что для вывода пучка будет использован параметрический резонанс горизонтальных колебаний $Q_h = \frac{1}{2}$. Этим продиктован выбор рабочей точки: $Q_h = 0.572$, $Q_v = 1.366$, показанной на рис.4 крестом.

Проверка и уточнение выбранных параметров производилось с помощью программы MAD^{5/}. На рис.5 приведены структурные функции для одного суперпериода. Максимальные значения горизонтальной β -функции $\beta_h = 6.2$ м, вертикальной $\beta_v = 3.2$ м, дисперсионной функции $D_h = 17$ м. (Параметры матрицы Твисса связаны известными /9/ соотношениями с элементами матрицы перехода $\alpha_{h,v} = (m_{11} - m_{22}) / 2 \cdot \sin \mu$; $\beta_{h,v} = m_{12} / \sin \mu$; $\gamma = -m_{21} / \sin \mu$). Уточненные значения: $\epsilon = 19.1^\circ$, $Q_h = 0.5753$, $Q_v = 1.3713$.

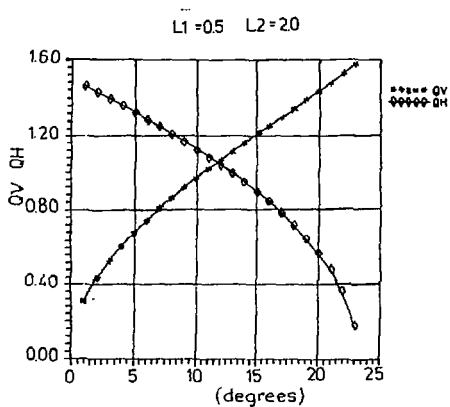


Рис. 3

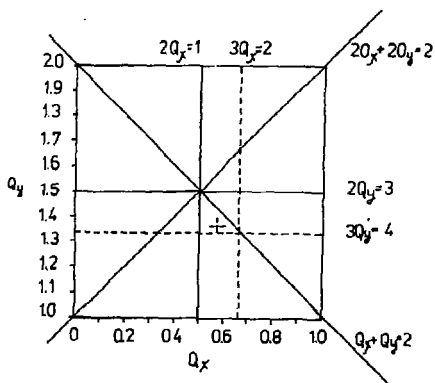


Рис. 4

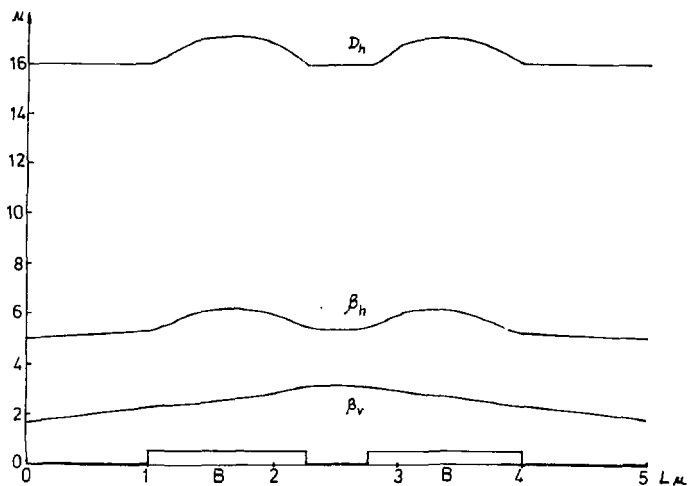


Рис. 5

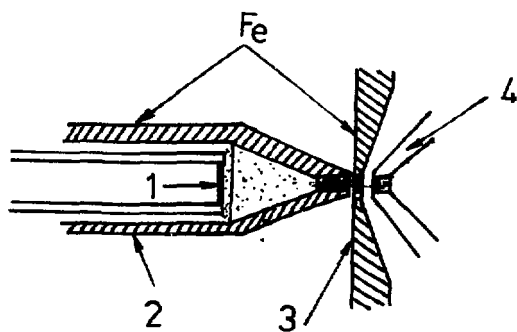


Рис. 6

3. Инжектор

Современные источники ионов обеспечивают получение положительных многозарядных, отрицательных и поляризованных ионов. По принципу действия их можно разделить на плазменные и с поверхностной ионизацией. В плазменных источниках ионы образуются в веществе, находящемся в газо- или парообразном состоянии в разрядной камере, при ионизации нейтральных атомов или молекул электронами и в процессе ионно-атомных соударений. Для этого используют один из видов электрического разряда, в результате чего в объеме разрядной камеры создается плазма. Для стабильного электрического разряда в плазме требуется минимальное давление от 10^{-2} до 1 Па газа или пара, доставляемого в камеру извне.

В дуоплазматронах (рис.6) разряд возникает между подогранным катодом 1 и анодом 3 в продольном магнитном поле. Высокой плотности плазма достигает за счет двойного сжатия промежуточным электродом 2 и неоднородным магнитным полем (0.3 - 1 Тл) между промежуточным электродом и анодом. На вытягивающем электроде 4 приложено отрицательное напряжение - 30 кВ. Магнитное поле концентрирует плазму вблизи выходного отверстия, обеспечивая плотность порядка 10^{14}см^{-3} . Дуоплазматрон дает высокое содержание полезных ионов (до 90% для водорода) и большой ток (сотни миллиампер). Эмиттанс пучка составляет от 10 до 100 мм·мрад.

Предполагаемый ток протонов ≥ 50 мА, энергия - 30 кэВ, длительность импульса - 20-50 мкс, частота повторения импульсов ≥ 5 Гц.

Ускорителем для инжектора выбран линейный ускоритель с поперечной фокусировкой ускоряющим полем /7/. Ускоряющая и фокусирующая система такого ускорителя - четырехпроводная линия со сложным профилем, причем сечение ее периодически изменяется по длине. Такую систему называют также системой с пространственно-однородной фокусировкой. Ускорители этого типа надежны в эксплуатации, включая и источник

протонов (по сравнению с электростатическими ускорителями). Энергия протонов на выходе из инжектора - 2 МэВ, ускоренный ток - 35 мА, частота ВЧ - 425 МГц.

4. Ввод и вывод

Предполагается ввод и вывод протонов осуществлять в вертикальной плоскости. При однооборотной инжекции пучок с относительно большим эмиттансом вводится инфлектором на орбиту в течение одного оборота, после чего напряжение на инфлекторе должно быть быстро снято. На рис.7 схематически показан инфлектор, который используется для инжекции протонов в вертикальной плоскости: O - средняя плоскость, в которой расположена орбита; p - протонный пучок. В течение одного оборота может быть инжектировано несколько сгустков.

Для вывода предполагается использовать схему с предварительным отклонением пучка на малый угол в горизонтальной плоскости с помощью электростатических септум-электродов. На рис.8 показаны такие электроды^{/8 /}, где K - катод, W - проволока, O - средняя плоскость.

Электростатические септум-электроды размещены перед магнитом Ламбертсона, который выводит пучок из синхротрона в вертикальной плоскости. На рис.9 схематически изображено сечение вертикальной плоскостью магнита Ламбертсона^{/9 /}:

O - средняя плоскость синхротрона, p_1 - неотклоненный пучок; J - ярмс магнита; K - обмотки; B - магнитное поле, отклоняющее пучок в вертикальном направлении; p_2 - пучок, отклоненный в горизонтальной плоскости электростатическим септум-электродом.

Такие комбинированные системы позволяют осуществлять медленный вывод пучка.

5. Ускоряющая система

В качестве ускоряющей системы предполагается использовать резонатор, нагруженный ферритом. На рис.10 схематически изображен такой резонатор^{/10,11 /}. Обозначения

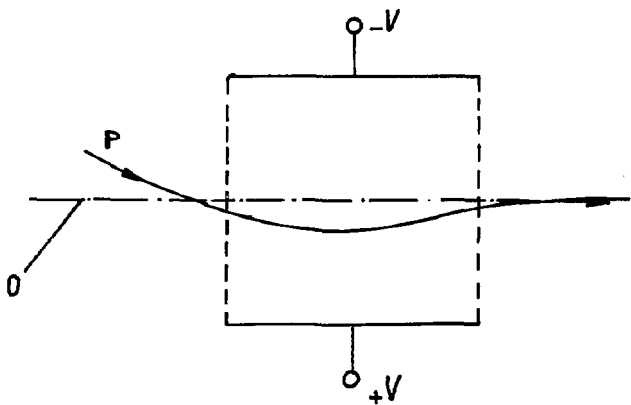


Рис. 7

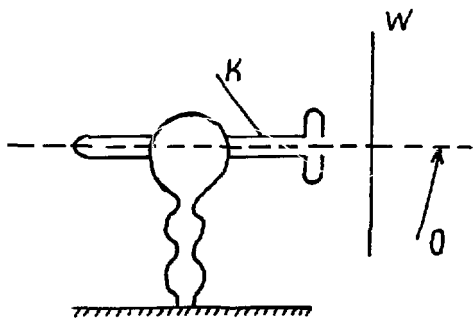


Рис. 8

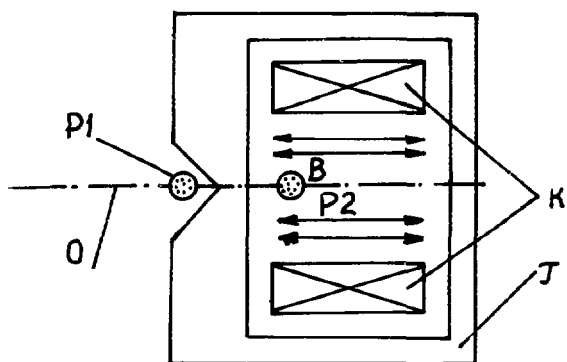


Рис. 9

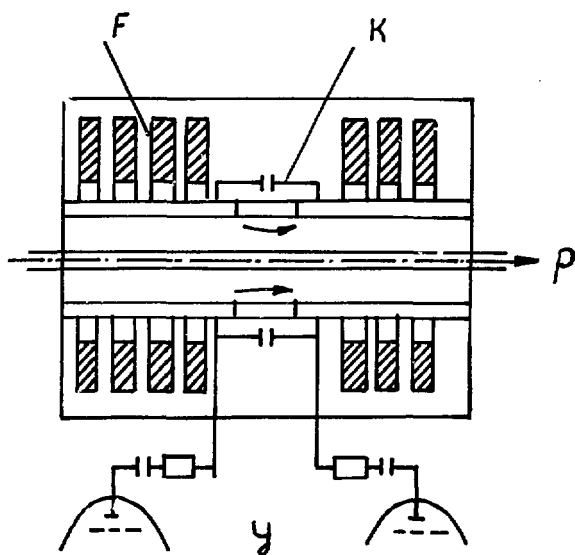


Рис. 10

на рисунке: F - ферритовые кольца, K - керамика, p - протонный пучок, y - усилитель, E - ускоряющее поле.

Для оценки требуемого прироста энергии за один оборот представляется удобным использовать следующий способ вычисления числа оборотов частицы в ускорителе. Пусть ускорение производится на частоте обращения, тогда частота ускоряющего поля определяется из соотношения^{12/}:

$$f = \frac{\beta c}{L} = \left(\frac{c}{L} \right) \left(\frac{E^2 - E_0^2}{E^2} \right)^{1/2}; \quad (3)$$

где L - периметр орбиты, $E = E_K + E_0$ - полная энергия протона, E_K - его кинетическая энергия и E_0 - энергия покоя, c - скорость света, $\beta = v/c$, v - скорость протона. Используя связь между энергией протона и магнитным полем:

$$\frac{(E^2 - E_0^2)^{1/2}}{c} = 300 \frac{BR}{c},$$

запишем (3) в виде

$$f(t) = \frac{c}{L} \cdot \frac{B(t)}{\{B^2(t) + [E_0/300R]^2\}^{1/2}};$$

где B измеряется в Тл, R - в метрах, энергия - в МэВ, t - в секундах. Число оборотов в синхротроне определяется интегралом

$$N = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt, \quad (4)$$

где $\Delta t = t_2 - t_1$ время ускорения.

Для выбранных параметров синхротрона: $E_{\text{ИНЖ}} = 2$ МэВ; конечная энергия $E_{\text{КОН}} = 250$ МэВ, $R = 1,6$ м, периметр $L = 20,053$ м, время ускорения $\Delta t = 5$ с, при линейном росте магнитного поля в процессе ускорения: $B(t) = B \cdot t + B_{\text{ИНЖ}}$ - получим полное число оборотов в синхротроне $N = 3,063 \cdot 10^6$. Т.о., прирост энергии за один оборот $\Delta E = (E_{\text{КОН}} - E_{\text{ИНЖ}}) / N \approx 81$ эВ.

Основные параметры синхротрона приведены в таблице.

Рассмотренный протонный синхротрон может быть использован также для ионной медицинской радиографии/13/.

Таблица

Энергия инжекции, $E_{\text{инж}}$	2.0 МэВ
Максимальная энергия, E	250 МэВ
Периметр	20.053 м
Число суперпериодов	4
Длины свободных промежутков L_1/L_2	0.5/2.0 м
Угол поворота магнита, θ	45°
Радиус поворота, R	1.6 м
Краевой угол магнита, ϵ	10.1°
Поле инжекции	0.128 Т
Максимальное поле	1.52 Т
Бетатронные частоты Q_h/Q_v	0.575 / 1.371
Число оборотов	$3.063 \cdot 10^6$
Прирост энергии за оборот	81 эВ
Коэффициент расширения орбит	6.8
Радиальная апертура (полная)/зазор	100 / 50 мм
Кратность	1
Частота ВЧ: инжекция/ выпуск	0.9753 / 9.18 МГц
Рабочий цикл: ускорение/выпуск/спад	0.5/1./0.5 с

Литература

- Endo R. et al.: Smaller Synchrotron Design for Proton Therapy. EPAC-90, Nice, Vol.2 (1990)1784.
- Little R.: Initial Operation of the LLUMC Accelerator and Beam Transport. Nucl.Instr.Meth.in Phys.Res., В 56 157 (1991)1192.
- Cole F. et al.: Design and Application of Proton Therapy Accelerator. Proc.of the IEEE Part. Accel. Conf. (1987)1985.
- Cole F. et al.: Loma Linda Medical Accel.Project. Proc.of the IEEE Part.Accel.Conf.(1989)737.
- Iselin P.C.: The MAD Program. CERN/LEP-TH/88-38.

6. Bruck H.: Accélérateurs Circulaires de Particules. Presses Universitaires de France, 1966.
7. Janík J., Krištiak J., Kuzmiak M.: Vysokofrekvenční kvadrupólový urychlovač. Čs. čas. fyz. A39 (1989)477.
8. Glenn J.W. et al.: AGS Slow Extraction Improvements, IEEE Trans.on Nucl.Sci., Vol.NS-26, No.3 part I, (1979)3167.
9. Rees G.H.: Extraction. CERN 85-19, (1985)346.
10. Baillod J.M. et al.: IEEE Trans.on Nucl.Sci., Vol.NS-30, No.4, part 2 (1983)3499.
11. Gardner I.S.K.: Ferrite dominated cavities. CERN 92-03, (1992), Vol.2,349.
12. Ливингуд Дж.: Принципы работы циклических ускорителей. М., Издат-во иностр. лит., 1963.
13. Шафранова М.Г., Шафранов М.Д.: Ионная медицинская радиография. УФН, № 131, вып.2, (1980)273.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 февраля 1993 года.