

P9-2011-82

С. Н. Доля, К. А. Решетникова

ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ИОНОВ C^{+6} — ИНЖЕКТОР
СИНХРОТРОНА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО
ДЛЯ АДРОННОЙ ТЕРАПИИ

Направлено на IX Международный семинар по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти проф. В. П. Саранцева, Алушта, Украина, 17–21 сентября 2011 г.

Доля С. Н., Решетникова К. А.

P9-2011-82

Линейный ускоритель ионов C^{+6} — инжектор синхротрона,
предназначенного для адронной терапии

Рассмотрено ускорение ионов углерода C^{+6} полем бегущей волны в спиральном волноводе. Частота ускоряющего ВЧ-поля $f_0 = 100$ МГц, мощность генератора $P_0 = 2$ МВт. Начальная энергия ионов $E_n = 50$ кэВ/нуклон, конечная $E_k = 5$ МэВ/нуклон, длина ускорителя $L = 10$ м. Спираль с начальным и конечным радиусами намотки $r_{0н} = 2$ см и $r_{0к} = 1$ см помещена в экран диаметром $2R = 100$ мм. Фокусировка ионов осуществляется соленоидальным магнитным полем напряженностью $B_0 = 3,5$ Тл. При увеличении длины ускорителя до $L = 15$ м конечная энергия ионов может быть увеличена до значения $E_k = 7$ МэВ/нуклон.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2011

Dolya S. N., Reshetnikova K. A.

P9-2011-82

Linear Accelerator of C^{+6} Ions as Injector
for a Synchrotron Intended for Hadron Therapy

We consider acceleration of C^{+6} ions by the field of a traveling wave in a helical waveguide. The frequency of the accelerating RF field $f_0 = 100$ MHz, generator power $P_0 = 2$ MW. The initial energy of ions $E_{in} = 50$ keV/nucleon, final energy $E_{fin} = 5$ MeV/nucleon, accelerator length $L_{acc} = 10$ m. A spiral with the initial and final radii of winding $r_{0in} = 2$ cm and $r_{0fin} = 1$ cm is placed in a screen of diameter $2R = 100$ mm. Ion focusing is provided by a solenoidal magnetic field with the intensity $B_0 = 3.5$ T. With increasing the accelerator length up to $L = 15$ m, the final energy of the ions can be increased up to a value of $E_{fin} = 7$ MeV/nucleon.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2011

Для лечения онкологических заболеваний методом адронной терапии требуются ионы углерода C^{+6} , ускоренные до энергии примерно 400 МэВ/нуклон. Такие ионы могут быть получены с помощью изохронного циклотрона или ионного синхротрона. В последнем случае требуется инжектор — линейный ускоритель ионов углерода C^{+6} ($Z/A = 1/2$) с энергией, примерно равной $E_k = 5$ МэВ/нуклон ($\beta_k = 0,1$, где $\beta = V/c$ — скорость, выраженная в единицах скорости света в вакууме).

1. ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Примем периметр синхротрона равным 30 м. Тогда при однооборотной инжекции длительность импульса инжектируемого пучка будет $\tau = 1$ мкс. Учтем, что для лечения одного пациента требуется пучок с интенсивностью, примерно равной $N_{C^{+6}} = 3 \cdot 10^9$ с $^{-1}$. Пусть синхротрон работает с циклическостью $F = 1$ Гц. Начальная энергия ускоряемых ионов может быть порядка $W_n = 50$ кэВ/нуклон ($\beta_n = 0,01$), при этом не будет больших проблем с высоковольтным источником ($U = 100$ кВ) и трубкой дрейфа.

2. ИОННЫЙ ИСТОЧНИК

Ионы углерода и протоны могут быть получены в требуемых количествах и с нужной интенсивностью пучка с помощью ECR-источника ионов. Однако этот источник является сложным и дорогим прибором, который плохо сопрягается с наиболее подходящими для применения в онкологии синхротронами, работающими в импульсном режиме. Более предпочтительным является электронно-лучевой источник ионов.

3. ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ

Традиционно для ускорения ионов использовались ускорители с азимутально-симметричной волной. Как известно [1], в этом случае нельзя получить одновременно радиальную и фазовую устойчивость, при выполнении условий автофазировки для радиальной фокусировки требуются внешние поля. В ускорителях на стоячей волне квадрупольные фокусирующие линзы размещались внутри трубок дрейфа в резонаторах, фокусировка ионов внешним продольным полем вообще не использовалась, так как ранее не была развита

технология получения постоянных соленоидальных полей большой напряженности.

В. В. Владимирским [2] в 1956 г. было предложено ввести азимутально-несимметричную компоненту в зазоры резонаторов и осуществить фокусировку за счет геометрии самого ускоряющего поля. Впоследствии это предложение трансформировалось в резонаторы с «пальцами» и RFQ-структуры. Такие структуры требуют высокой точности изготовления и выдерживания при сборке и настройке жестких допусков.

Благодаря развитию технологии создания сверхпроводящих соленоидов может оказаться проще и дешевле ускорять ионы азимутально-симметричной волной, а их фокусировку осуществлять продольным магнитным полем.

В резонаторах, работающих на стоячей волне, трубки дрейфа (бесполезные с точки зрения ускорения) занимают $3/4$ длины ускорителя, вся напряженность поля при этом сосредоточена в зазорах резонаторов, работающих в предпробойном режиме. В ускорителе, работающем на бегущей волне, этой проблемы нет. Длительность высокочастотного импульса при ускорении на бегущей волне может быть короткой, так как в этом случае нет необходимости возбуждать высокочастотные резонаторы.

4. УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА НА БАЗЕ СПИРАЛЬНОГО ВОЛНОВОДА

Ускоритель-инжектор можно построить на базе спирального волновода, работающего на частоте $f_0 = 100$ МГц ($\lambda_0 = 3$ м), в котором для поддержания синхронизма между частицами и волной меняется не только шаг спирали, но и радиус каркаса, на который спираль намотана [3, 4]. Каркас должен иметь конусную форму: начальный радиус спиральной намотки равен $r_{0н} = 2$ см, конечный $r_{0к} = 1$ см, это позволяет существенно увеличить равномерность распределения поля вдоль оси спирального волновода.

При мощности высокочастотного генератора $P_0 = 2$ МВт и выбранной синхронной фазе $\sin \phi_s = 60^\circ$ длина ускорителя получается короткой, равной примерно $L = 10$ м, за счет ускорения на бегущей волне (напряженность поля волны $E \approx 10$ кВ/см).

К точности изготовления и сборки структуры спирального волновода нет жестких требований. Это объясняется тем, что в формировании поля волны ($\lambda = \beta\lambda_0 = 3-30$ см, $h = 0,1-0,6$ см, где β — скорость частиц, λ_0 — длина волны в свободном пространстве, h — шаг намотки спирали) участвует большое число витков спирали и поэтому допуск на шаг намотки спирали не жесткий.

Радиальная устойчивость должна обеспечиваться внешним магнитным полем $B_0 = 3,5-6$ Тл, создаваемым сверхпроводящим соленоидом, расположенным снаружи. Диаметр внутреннего отверстия соленоида D_i должен быть

больше диаметра внешнего проводника спирального волновода $2R$, $D_i > 2R$, внутренний диаметр соленоида — порядка 10–15 см.

Расположенный таким образом экран практически не влияет на электродинамические свойства спирали и не создает трудностей в изготовлении сверхпроводящего соленоида.

Начальная скорость частиц пучка ионов углерода, полученных от электронно-лучевого источника, находится в диапазоне $\beta_{t0} = (\beta_{r0}^2 + \beta_{\phi0}^2)^{1/2} < 3 \cdot 10^{-4}$. Оценка площади фазового эллипса пучка $\mathcal{E} = \pi r_b \cdot \beta_t / \beta_z$ дает величину $\mathcal{E} = \pi \cdot 2(3 \cdot 10^{-4} / 0,02) = 30\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$, которая без особенных проблем может быть получена в ионных источниках. При этом чем больше магнитное поле соленоида B_0 , фокусирующее ионы в линейном ускорителе, тем больше может быть начальный радиус частиц пучка.

5. СТРУКТУРА ПОЛЯ В СПИРАЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ, ПОМЕЩЕННОМ В ЭКРАН

Выражения для полей в спирали, помещенной во внешний металлический цилиндр (экран), могут быть записаны в виде, где индекс 1 относится к области внутри спирали, а индекс 2 — к области вне спирали [5]:

$$\begin{aligned}
 E_{z1} &= E_0 I_0(k_1 r), \\
 E_{r1} &= i(k_3/k_1) E_0 I_1(k_1 r), \\
 H_{\phi1} &= i\varepsilon(k/k_1) E_0 I_1(k_1 r), \\
 H_{z1} &= -i(k_1/\mu k) \text{tg} \Psi I_0(k_1 r_0) E_0 I_0(k_1 r) / I_1(k_1 r_0), \\
 E_{\phi1} &= -\text{tg} \Psi I_0(k_1 r_0) E_0 I_1(k_1 r) / I_1(k_1 r_0), \\
 H_{r1} &= (k_3/\mu k) \text{tg} \Psi I_0(k_1 r_0) E_0 I_1(k_1 r) / I_1(k_1 r_0);
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 E_{z2} &= I_0(k_1 r_0) E_0 [K_0(k_1 r) - f_{01} I_0(k_1 r)] / K_0(k_1 r_0) d_0, \\
 E_{r2} &= -i(k_3/k_1) I_0(k_1 r_0) E_0 [K_1(k_1 r) + f_{01} I_1(k_1 r)] / K_0(k_1 r_0) d_0, \\
 H_{\phi2} &= -i(k/k_1) I_0(k_1 r_0) E_0 [K_1(k_1 r) + f_{01} I_1(k_1 r)] / K_0(k_1 r_0) d_0, \\
 H_{z2} &= i(k_1/k) \text{tg} \Psi I_0(k_1 r_0) [E_0 K_0(k_1 r) + f_1 I_0(k_1 r)] / K_1(k_1 r_0) d_1, \\
 E_{\phi2} &= -\text{tg} \Psi I_0(k_1 r_0) E_0 [K_1(k_1 r) - f_1 I_1(k_1 r)] / K_1(k_1 r_0) d_1, \\
 H_{r2} &= (k_3/\mu k) \text{tg} \Psi I_0(k_1 r_0) E_0 [K_1(k_1 r) - f_1 I_1(k_1 r)] / K_1(k_1 r_0) d_1,
 \end{aligned} \tag{2}$$

где $k = \omega/c$, $k_1 = (k_3^2 - k^2)^{1/2}$, $k_3 = 2\pi/\beta\lambda_0$, $d_0 = 1 - f_{01} I_0(k_1 r_0) / K_0(k_1 r_0)$, $d_1 = 1 - f_1 I_1(k_1 r_0) / K_1(k_1 r_0)$, $f_{01} = K_0(k_1 R) / I_0(k_1 R)$, $f_1 = K_1(k_1 R) / I_1(k_1 R)$ и где, как и в [5], мы опустили множитель $e^{i(\omega t - k_3 z)}$.

Дисперсионное уравнение для спирали, помещенной во внешний металлический цилиндр (экран), получено в [5]:

$$\operatorname{ctg}^2 \Psi = (k_1^2/k^2)I_0(k_1 r_0)K_0(k_1 r_0)/I_1(k_1 r_0)K_1(k_1 r_0)\eta, \quad (3)$$

где

$$\eta = \frac{[1 - I_0(k_1 r_0)K_0(k_1 R)/I_0(k_1 R)K_0(k_1 r_0)]}{[1 - I_1(k_1 r_0)K_1(k_1 R)/I_1(k_1 R)K_1(k_1 r_0)]}. \quad (4)$$

Выражение для связи потока мощности, распространяющегося в экранированной спирали, с напряженностью электрического поля на оси для спирального волновода с радиусом экрана R выглядит так:

$$P = (c/8)[kk_3/k_1^2]E_0^2 r_0^2 \{(I_1^2 - I_0 I_2)(1 + I_0 K_1/I_1 K_0 \eta) + 2[I_0^2 F_1/K_0^2 d_0^2 + I_1 K_0 F_2/I_0 K_1 \eta d_1^2]\}, \quad (5)$$

где I_0 , K_0 , I_1 , K_1 — значения соответствующих функций Бесселя при значении аргумента, равном $k_1 r_0$:

$$F_1 = \int_{r_0}^R \check{Z}_1^2 r dr, \quad F_2 = \int_{r_0}^R \check{Z}_2^2 r dr, \quad (6)$$

$$\check{Z}_1 = K_1(k_1 r) + f_{01} I_1(k_1 r), \quad \check{Z}_2 = K_1(k_1 r) - f_1 I_1(k_1 r). \quad (7)$$

При $R \rightarrow \infty$ соответствующие выражения стремятся к своим предельным значениям: $f_{01} \rightarrow 0$, $f_1 \rightarrow 0$, $d_0 \rightarrow 1$, $d_1 \rightarrow 1$, а выражения для полей в области между экраном и спиралью переходят в выражения для полей в спирали, находящейся в свободном пространстве. Выражение (5) упрощается при предельном переходе до соответствующей формулы из [5], связывающей поток мощности с напряженностью поля на оси, для спирали без экрана.

Роль внешнего экрана заключается в уменьшении напряженности электрического поля на оси спирали, в соответствующем уменьшении конечной энергии частиц (фазовой скорости волны) при заданной длине ускорителя и некотором увеличении шага спирали [5].

6. ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ. ПРОДОЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ИОНОВ

Ускорение ионов должно производиться до скорости $\beta_k = 0,1$, а начинаться со скорости $\beta_n = 0,01$; при увеличении скорости в 10 раз энергия увеличится в 100 раз, конечная энергия будет равна 5 МэВ/нуклон.

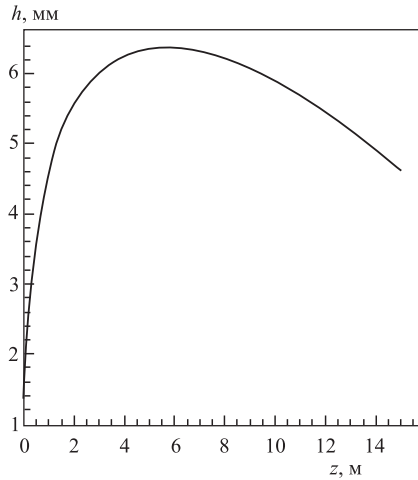


Рис. 1. Зависимость шага намотки спирали от длины ускорения

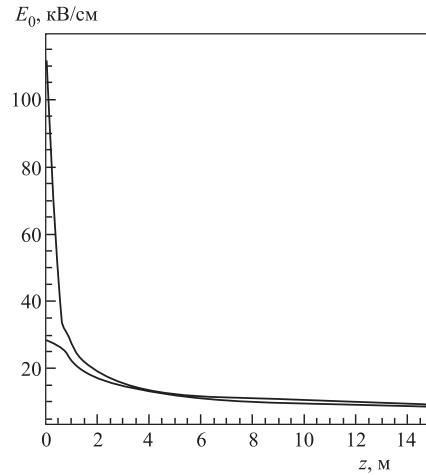


Рис. 2. Зависимость напряженности поля на поверхности спирали (верхняя кривая) и на ее оси от длины ускорения

Такой ускоритель можно построить на базе спирального волновода. Параметры высокочастотной системы и ускорителя будут примерно такими: частота ускорения $f_{\text{л}} = 100$ МГц, мощность $P_0 = 2$ МВт, длительность импульса $\tau_{\text{л}} = 1$ мкс, длина ускорителя $L_{\text{л}} = 10$ м.

Расчеты по точным формулам (для параметров: начальный радиус спирали $r_{0\text{н}} = 2$ см, конечный радиус спирали $r_{0\text{к}} = 1$ см, начальная скорость $\beta_{\text{н}} = 0,01$, конечная скорость $\beta_{\text{к}} = 0,1$, радиус экрана $R = 5$ см, частота ускорения $f_0 = 100$ МГц, мощность $P_0 = 2$ МВт, фокусирующее магнитное поле $B_0 = 3$ Тл) показали, что длина ускорителя в этом случае будет $L = 10$ м. На рис. 1 приведена зависимость требуемого шага намотки спирали от длины ускорения. На рис. 2 показана зависимость напряженности электрического поля на поверхности спирали и на ее оси от длины ускорения. Напряженность электрического поля остается примерно постоянной на всей длине ускорителя.

7. ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ. РАДИАЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ИОНОВ

Поперечное кулоновское поле E_r может быть оценено по формуле

$$E_r = 2\pi Z e n_i r_b = 500 \text{ В/см.} \quad (8)$$

Это поле суммируется с полем волны $E_r = E_0 k_1 r / 2 = E_0 2\pi r_b / \beta_i \lambda_0 = 3$ кВ/см, которое для выбранных параметров примерно в 6 раз больше кулоновского поля на поверхности пучка. На рис. 3 приведена зависимость макси-

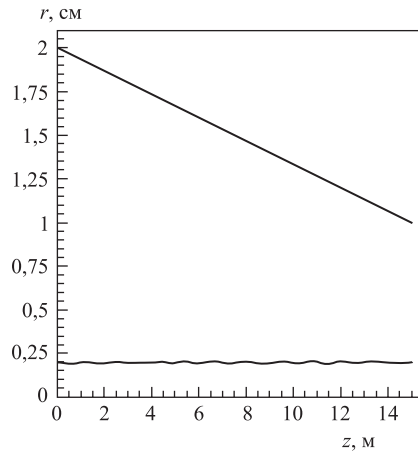


Рис. 3. Зависимость максимального радиального отклонения частиц пучка от длины ускорения. Верхняя прямая — профиль каркаса, на который намотана спираль

мального радиального отклонения частиц пучка с начальными параметрами $r_b < 0,2$ см, $\beta_{r0} = 2 \cdot 10^{-4}$, $\beta_\phi = -2 \cdot 10^{-4}$ от длины ускорения в магнитном поле $B_0 = 3,5$ Тл. Надо сказать, что в предлагаемом ускорителе требуемое для фокусировки магнитное поле возрастает с увеличением начального радиуса пучка.

8. ЗАТУХАНИЕ ВОЛНЫ В СПИРАЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ

Затухание мощности в спиральном волноводе будет приводить к тому, что синхронная фаза, рассчитанная без затухания, будет «уходить» от синхронной фазы, полученной для ускорения частиц с учетом затухания.

Затухание при распространении волны в спирали связано с омическими потерями токов, текущих по спирали. Потери мощности на один виток равны

$$\Delta P = 1/2 I_\phi^2 R. \quad (9)$$

Если токи выражены в амперах, а сопротивление в омах, то размерность ΔP — в ваттах. Рассчитаем R — сопротивление витка: $R = 2\pi\rho r_0/(\pi\delta d_{\text{пр}})$. Будем считать виток медным, тогда $\rho = 1,7 \cdot 10^{-6}$ Ом·см — удельное сопротивление меди, r_0 — радиус витка спирали, начальный радиус спиральной намотки равен $r_{0н} = 2$ см, конечный $r_{0к} = 1$ см, $\delta = c/\sqrt{2\pi\sigma\omega}$ — глубина скин-слоя. Проводимость для меди $\sigma = 5,4 \cdot 10^{17}$ с⁻¹, круговая частота $\omega = 2\pi f_0$, $f_0 = 10^8$ МГц — частота ускорения. Диаметр провода, которым намотана спираль, возьмем равным $d_{\text{пр}} = 0,1$ см.

Вместо токов в формулу (9) удобно подставить связанные с токами магнитные поля:

$$I_\phi^2 = 1,226^{-2} n^{-2} H_z^2, \quad (10)$$

где размерность H_z — в гауссах, $n = 1/h$ — число витков на 1 см длины, h — шаг намотки в сантиметрах. Поскольку на 1 см намотано n витков, окончательно для $\Delta P = 1/2 I_\phi^2 R$ (Вт/см) получим

$$\Delta P = 1,226^{-2} n^{-1} H_z^2 \rho r_0 / (\delta d_{\text{пр}}). \quad (11)$$

При подстановке в (11) чисел $n = 8/\text{см}$, $H_z^2 = 4 \cdot 10^4 \text{ Гс}^2$, $\rho = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$, $r_{0\text{н}} = 2 \text{ см}$, $\delta = 6,5 \cdot 10^{-4} \text{ см}$, $d_{\text{пр}} = 10^{-1} \text{ см}$ для начала спирали получим $\Delta P = 200 \text{ Вт/см}$. Введем величину 2α — эффективную длину уменьшения мощности:

$$\Delta P/P_0 = -2\alpha = 10^{-4} \text{ см}^{-1}. \quad (12)$$

Длина $1/\alpha$, равная 200 м, соответствует уменьшению напряженности поля в e раз. На рис. 4 показана зависимость магнитного поля на поверхности спирали от длины ускорения, а на рис. 5 зависимость мощности, распространяющейся в спирали, от длины ускорения. Видно, что затухание не играет определяющей роли при ускорении ионов в спиральном волноводе.

На рис. 6 приведены две кривые, показывающие зависимость роста энергии ионов от длины ускорения, с учетом затухания (нижняя кривая) и без учета затухания. Очевидно, что разница в энергии при длине ускорителя $L = 15 \text{ м}$ невелика.

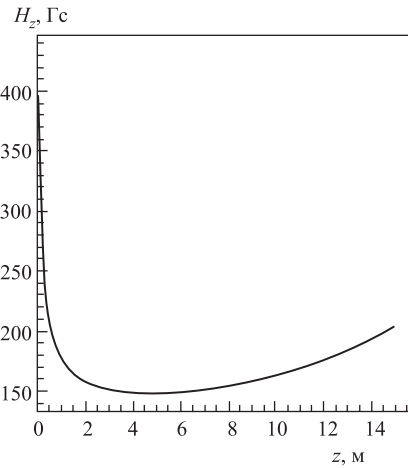


Рис. 4. Зависимость магнитного поля на поверхности спирали от длины ускорения

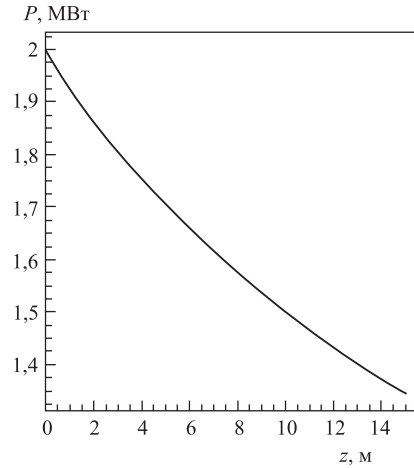


Рис. 5. Зависимость мощности от длины ускорения

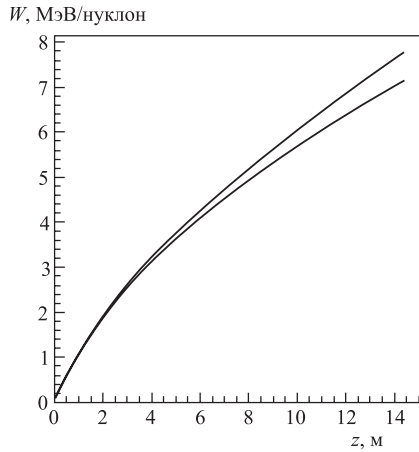


Рис. 6. Зависимость роста энергии ионов от длины ускорения. Нижняя кривая построена с учетом затухания в структуре

В таблице приведены основные параметры рассматриваемого ускорителя.

В синхротроне, предназначенном для адронной терапии, диапазон перестройки частоты и магнитного поля составляет величину, примерно равную 10, от $\beta_n \gamma_n \approx 0,1 \cdot 1 = 0,1$ до $\beta_k \gamma_k \approx 0,7 \cdot 1,4 = 1$. Чтобы уменьшить диапазон перестройки частоты и поля, надо увеличивать энергию инжекции. В данном случае это можно сделать, увеличив длину ускорения до $L = 15$ м, тогда $E_k = 7$ МэВ/нуклон и диапазон перестройки частоты будет равен $1/0,12 = 8,33$.

Основные параметры ускорителя ионов углерода C^{+6}

Частота ускорения f_0 , МГц	100
Длительность импульса, мкс	1
Мощность ВЧ-генератора, МВт	2
Начальный-конечный радиус спирали, см	2-1
Радиус внешнего проводника-экрана, см	5
Начальная энергия частиц, кэВ/нуклон	50
Конечная энергия частиц, МэВ/нуклон	5
Поперечные скорости в пучке, $\beta_{t0} = (\beta_{r0}^2 + \beta_{\phi 0}^2)^{1/2}$	$< 3 \cdot 10^{-4}$
Начальный радиус пучка ионов r_b , см	0,2
Фокусирующее соленоидальное магнитное поле B_0 , Тл	3,5
Длина ускорителя, м	10

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахиезер А. И., Файнберг Я. Б. Линейное ускорение заряженных частиц // Теория и расчет линейных ускорителей: Сб. М.: Госатомиздат, 1962. С. 5.
2. Владимирский В. В. Вариант жесткой фокусировки в линейном ускорителе // Приборы и техника эксперимента. 1956. № 3. С. 35.
3. Доля С. Н., Решетникова К. А. Ускорение тяжелых ионов в спиральном волноводе. Сообщение ОИЯИ Р9-2007-120. Дубна, 2007.
4. Доля С. Н., Решетникова К. А. Два варианта инжекции тяжелых ионов в бустер нуклотрона. Сообщение ОИЯИ Р9-2008-76. Дубна, 2008.
5. Ахиезер А. И., Файнберг Я. Б. Медленные электромагнитные волны // УФН. 1951. Т. 44, вып. 3. С. 322.

Получено 29 июля 2011 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 18.11.2011.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,68. Уч.-изд. л. 0,82. Тираж 230 экз. Заказ № 57499.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/