

P9-2007-120

С. Н. Доля, К. А. Решетникова

УСКОРЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В СПИРАЛЬНОМ
ВОЛНОВОДЕ

Доля С. Н., Решетникова К. А.

P9-2007-120

Ускорение тяжелых ионов в спиральном волноводе

Рассмотрена возможность ускорения ионов урана с зарядом $+32$ в двух секциях спирального волновода при мощности двух каналов генератора $P = 3$ МВт каждый и частоте $f = 150$ МГц. Начальная энергия пучка 84 кэВ/нуклон, конечная — 8 МэВ/нуклон, суммарная длина двух секций спирального волновода равна 30 м. Радиус спирали на длине 7 м изменяется линейно от $2,6$ до 1 см, далее остается равным 1 см до конца. Радиус кожуха принят равным $7,5$ см. Шаг винта изменяется от $2,1$ в начале до $4,5$ мм в конце. Радиальная фокусировка обеспечивается продольным магнитным полем, равным 6 Тл. Расчет напряженностей полей проведен с учетом потерь мощности в спирали из меди с серебряным покрытием.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2007

Dolya S. N., Reshetnikova K. A.

P9-2007-120

Heavy Ions Accelerator by the Spiral Waveguide

Heavy ions accelerator contains two sections 16 and 13 meters long. Ions of uranium with the charge $Z = +32$ have energy from 84 keV/nucl. to 8 MeV/nucl. at the end. Generator power is 3 MW (each channel), frequency is $f = 150$ MHz. The radius of the spiral waveguide r_0 changes from $r_0 = 2.6$ cm at the beginning to $r_0 = 1$ cm at length $l = 7$ m and then became permanent. The radius of outside cylinder is $R = 7.5$ cm, the step of spiral waveguide changes from $h = 2.1$ mm at the beginning to $h = 4.5$ mm at the end. Beam focusing is provided by the solenoid magnetic field $B = 6$ T. The fields are calculated taking into account the power losses in the copper spiral waveguide covered with silver.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2007

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к исследованиям на пучках тяжелых ионов стимулирует поиск систем, эффективно ускоряющих ионы в области низких энергий.

Известно [1], что в азимутально-симметричной бегущей волне одновременное достижение фазовой и радиальной устойчивости невозможно. Эта проблема привела к созданию ускорителей с высокочастотной квадрупольной фокусировкой [2, 3], позволяющих достичь очень малых фазовых скоростей волны. Такие системы, однако, достаточно сложны в изготовлении и их трудно настраивать.

Другим устройством, позволяющим начинать ускорение с очень малых фазовых скоростей, является спиральный волновод [4] с азимутально-симметричной волной, радиальная фокусировка здесь должна достигаться за счет внешних полей.

Чтобы оценить необходимую степень замедления, возьмем напряжение на форинжекторе равным $U = 500$ кВ, отношение заряда к массе тяжелых ионов, получаемых из источника, примем равным $Z/A = 0,1$, Z — заряд иона, A — атомный вес. Это, например, ионы свинца Pb^{+21} или урана U^{+24} с энергией 50 кэВ/нуклон. Тогда относительная фазовая скорость волны в начале ускорителя должна быть равна $\beta_{ф\text{ начальн}} = 0,01$. Конечная скорость частиц (энергия инжекции в циклическую машину) должна быть порядка $\beta_{ф\text{ конечн}} = 0,1$, так что инжектор должен увеличить скорость частиц на порядок (по сравнению с форинжектором).

Возьмем радиус спирали $r_0 = 2,6$ см, радиус кожуха (вакуумного патрубка) $R = 7,5$ см. Спираль должна быть намотана на каркас диаметром ~ 40 мм, залита диэлектриком для исключения межвиткового пробоя и крепления сборки в вакуумном патрубке. При этом наружный диаметр сборки получается равным ~ 60 мм. Это позволит вставлять сборку в направляющие в вакуумный патрубок.

Мощность подается в спираль от генератора по коаксиальному фидеру через согласователь. Выводится также через согласователь в коаксиальный фидер и в конечном итоге в согласованную нагрузку. Собственно, ускоряющая структура представляет собой отрезок спирального кабеля, где ускорение осуществляется внутри спирально намотанной жилы, вблизи оси кабеля.

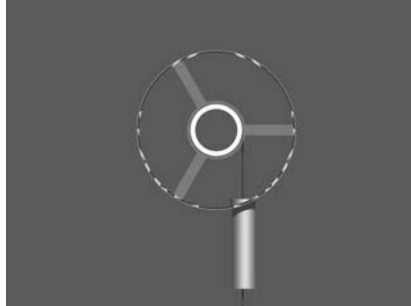


Рис. 1. Возможный вариант крепления спиральной сборки в вакуумном патрубке

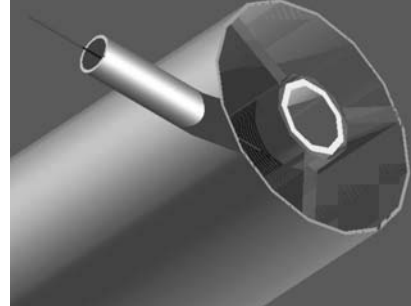


Рис. 2. Спиральная сборка в вакуумном патрубке

Схема спиральной сборки приведена на рис. 1.

Технологически спираль является продолжением внутренней жилы коаксиального фидера, подводящего к ней мощность. Спираль намотана на диэлектрический каркас (например, полиэтиленовый) и сверху залита диэлектриком, тем же полиэтиленом, для исключения межвиткового пробоя. Изнутри на каркас должно быть нанесено тонкое проводящее покрытие, например аквадаг, для устранения электростатических напряжений. Толщина покрытия должна быть много меньше глубины скин-слоя для выбранной частоты. Наружный проводник коаксиального фидера соединен с внешним цилиндром спирали.

Оценка глубины скин-слоя для меди на частоте $f = 150$ МГц дает $\delta = 5,4 \cdot 10^{-6}$ м. Для аквадага (графита) удельное сопротивление больше в 10^4 раз и глубина скин-слоя будет 0,5 мм.

Спиральная сборка центрируется в вакуумном патрубке с помощью трех направляющих, также изготовленных из полиэтилена.

На рис. 2 приведена схема спиральной сборки в изометрической проекции.

В качестве иллюстрации свойств спирального волновода рассмотрим ситуацию, когда возбуждение происходит от генератора с параметрами $P_1 = 3,0$ МВт, $P_2 = 3,0$ МВт, $f = 150$ МГц. Зарядности ионов возьмем те, которые дают источники тяжелых ионов: Pb^{+28} , U^{+32} . Посмотрим, какие параметры должны быть у спирального волновода, чтобы ускорить эти ионы до конечной энергии, необходимой для инъекции в циклический ускоритель.

Начальное отношение заряда к массе в этом случае равно $Z/A = 0,1334$, начальная скорость ионов после форинжектора будет

$$\beta_{\text{начальн}} = \sqrt{2ZeU/AMc^2} = 1,336 \cdot 10^{-2}. \quad (1)$$

Рассмотрим свойства спирального волновода с переменным радиусом и шагом. Большой начальный радиус выбран из соображений увеличения шага спирали в области ввода высокочастотной мощности. Затем радиус плавно (линейно на 7 м) уменьшается, тем самым темп ускорения в какой-то области поддерживается постоянным. Начальный радиус спирали 2,6 см, конечный — 1 см. Шаг спирали вычисляется из дисперсионного уравнения исходя из введенной мощности с учетом затухания в спирали. На рис. 3 приведен расчетный шаг спирали для выбранных параметров спирального волновода.

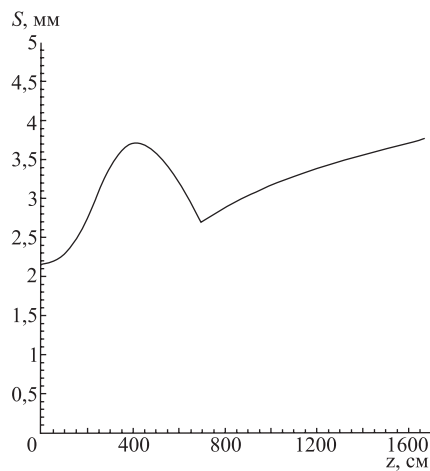


Рис. 3. Изменение шага спирали в зависимости от длины

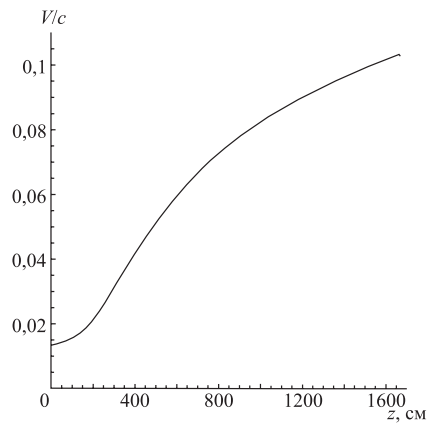


Рис. 4. Увеличение фазовой скорости по длине структуры

Приведем расчетные параметры ускорителя на основе спирального волновода (табл. 1).

При заполнении диэлектриком шаг спирали (как это следует из полученного нами дисперсионного уравнения) увеличивается примерно пропорционально $\sqrt{\varepsilon}$ (например, для керамики 22ХС $\varepsilon = 9$), и он может быть увеличен в три раза. Пробойное напряжение для полиэтилена составляет 200 кВ/мм, для плавленого кварца — 650 кВ/мм, так что межвиткового пробоя опасаться не следует.

Спиральная сборка мало чувствительна к точности изготовления (шагу намотки). Отношение ошибки в шаге намотки $\Delta h = 0,1$ мм к длине волны в системе ($\lambda_{\text{замедл}} \sim 2$ см) равно $5 \cdot 10^{-3}$, что дает ошибку в синхронной фазе $\sim 2^\circ$. Синхронная фаза во всех расчетах и графиках выбрана $\phi_s = \pi/6$, $\cos \phi_s = 0,866$. Поскольку в формировании поля участвуют сразу несколько витков (до 10), ошибки будут взаимно исключаться.

Таблица 1. Параметры спирального волновода с переменными радиусом и шагом спирали

Ускоряемый ион: от протонов до урана Протоны: $\cos \phi_s = 0,1154$, $\phi_s = 83,4^\circ$	p , Pb^{+28} , U^{+32}
Энергия инжекции $\epsilon_{начальн}$, кэВ/нуклон	84
Начальная скорость частиц $\beta_{начальн}$, V/c	0,01336
Конечная энергия $\epsilon_{конечн}$, МэВ/нуклон	5
Конечная скорость ионов $\beta_{конечн}$, V/c	0,1
Частота ВЧ-генератора f , МГц	150
Мощность ВЧ-генератора P , МВт	3
Начальный радиус конусной части спирали $r_{0\text{ начальн}}$, см	2,6
Конечный радиус конусной части спирали $r_{0\text{ конечн}}$, см	1
Длина конусной части спирали $L_{конусн}$, м	7
Радиус кожуха R , см	7,5
Радиус цилиндрической части спирали $r_{0\text{ цилиндр}}$, см	1
Длина цилиндрической части спирали $L_{цилиндр}$, м	9,5
Шаг спирали в начале секции $h_{начальн}$, мм	2,15
Шаг спирали в конце секции $h_{конечн}$, мм	3,75
Радиус пучка начальный $r_{начальн}$, см	0,5
Радиус пучка конечный $r_{конечн}$, см	0,8
Начальный разброс скоростей $(V_r/V_z)_{начальн}$	$5 \cdot 10^{-2}$
Фокусирующее магнитное поле, Тл	6
Общая длина волновода $L_{общ}$, м	16,5

Рост фазовой скорости по длине системы подбирался в соответствии с ростом набора энергии частицами. Синхронная частица расположена на оси системы и все время находится в одной и той же фазе поля, непрерывно ускоряясь. И волна, и частица движутся ускоренно. Начальная фазовая скорость $\beta_{ф. начальн} = 0,01336$ определяется зарядностью иона и напряжением на форинжекторе. Конечная энергия может быть выбрана (длиной волновода) из условий инжекции в циклическую машину. Рис. 4, 5 иллюстрируют увеличение фазовой скорости волны в зависимости от длины спирального волновода и, соответственно, увеличение энергии ускоряемых ионов.

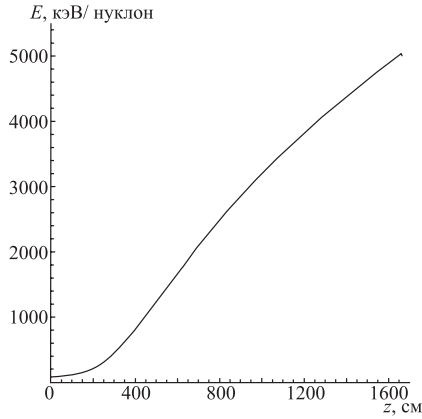


Рис. 5. Набор энергии ионами

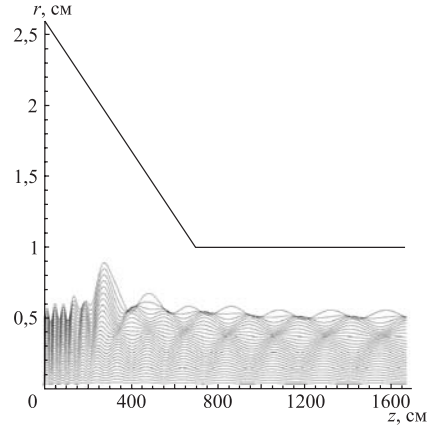


Рис. 6. Фокусировка при начальном радиусе пучка 0,5 см

Введем, следуя [5], параметр $W_\lambda = (Z/A)eE\lambda \cos \phi_s / \epsilon_0$ — отношение прироста энергии синхронной частицы на длине волны λ к энергии покоя.

Радиальное движение ускоряемых ионов и профиль каркаса, на который намотан спиральный волновод, приведены на рис. 6. На рис. 7 показано распределение радиального электрического поля на радиусе 0,5 см в зависимости от длины спирального волновода. На рис. 8 показано фазовое движение частиц пучка ионов, захваченных в режиме ускорения. По оси абсцисс — расстояние от начала намотки спирального волновода, по оси ординат — отношение текущей фазы частиц пучка к синхронной.

Вычислим W_λ для случая $Z/A = 0,1334$, $\cos \phi_s = \sqrt{3}/2$, $E = 3$ кВ/см, получим $W_\lambda = 7,37 \cdot 10^{-5}$, что более чем на порядок меньше, чем в обычных ускорителях протонов (Альвареса) на стоячей волне: $W_\lambda = 2,7 \cdot 10^{-3}$.

Введем еще один параметр $\Omega_c = \omega(W_\lambda \operatorname{tg} \phi_s / 2\pi\beta_s)^{1/2}$ — частоту фазовых колебаний. Подставляя численные значения, получим соотношения $\Omega_c = 2,1 \cdot 10^7$, $\Omega_c/\omega = 2,24 \cdot 10^{-2}$.

Оценим частоту радиальных бетатронных колебаний для поля 6 Тл. Получим $\omega_n = (Z/A)eH/Mc = 7,66 \cdot 10^7$. Частота радиальных бетатронных колебаний ω_n должна в корень из двух раз превосходить [6] частоту фазовых колебаний Ω_c , поэтому радиальная фокусировка в данном случае не должна вызывать больших проблем. Для протонов ситуация еще легче, так что ускоритель на бегущей волне может ускорять все ионы от протонов до урана.

Учтем затухание волны из-за поверхностных токов, текущих в основном по спирали. Будем рассчитывать потери на один шаг спирали. Учитывается

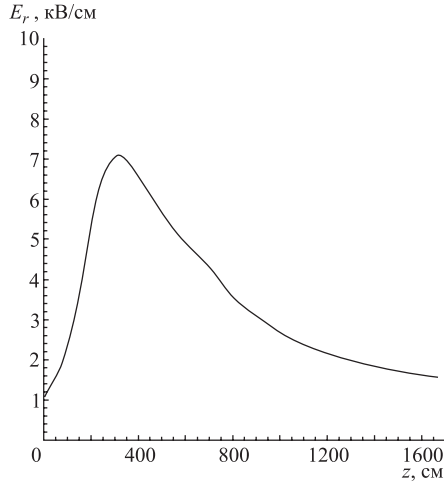


Рис. 7. Радиальное электрическое поле волны

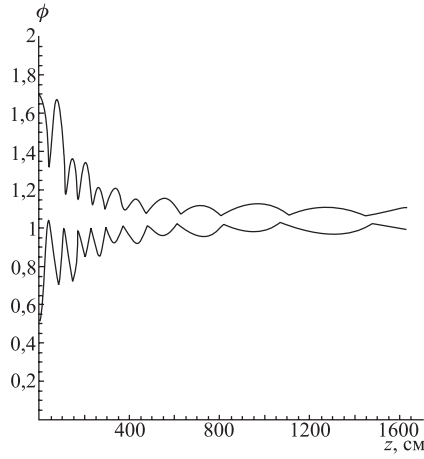


Рис. 8. Фазовое движение

только ток I_ϕ . Потери определяются законом Ома:

$$\Delta P(\text{Вт})/\text{шаг} = (1/2)I_\phi^2 R, \quad (2)$$

где $R = \rho l/S$ — сопротивление витка; $l = 2\pi r_0$ — длина витка; $S = 2\pi r_{\text{провода}} \delta$; δ — глубина скин-слоя. Подставляя в (3), получим

$$\Delta P(\text{Вт})/\text{шаг} = \{(1/2)\rho r_0/(r_{\text{провода}}\delta)\}I_\phi^2. \quad (3)$$

Для начальной части спирального волновода $r_0 = 2,5$ см, радиус провода $r_{\text{провода}} = 5 \cdot 10^{-2}$ см, глубина скин-слоя $\delta = 5,4 \cdot 10^{-4}$ см, удельное сопротивление меди $\rho = 1,6 \cdot 10^{-6}$ Ом · см. Подставляя численные значения для начальной части спирального волновода, найдем, что член в фигурных скобках, стоящий перед I_ϕ^2 , равен $R = 8 \cdot 10^{-2}$ Ом.

Теперь надо вычислить I_ϕ . Зная магнитное поле на поверхности спирали H_z , найдем I_ϕ из соотношения

$$H_z = (4\pi/10)I_\phi, \quad (4)$$

где H_z измеряется в Гс, а I_ϕ в А/см. Подставляя в формулу (3) ток I_ϕ из (4), получим выражение для потерь:

$$\Delta P(\text{Вт})/\text{шаг} = 8 \cdot 10^{-2} \cdot H_z^2 \cdot 1,2556^{-2}. \quad (5)$$

В данном случае I_ϕ — это поверхностный ток. Чтобы получить ток в одном витке (потери на одном шаге), надо разделить этот ток на n — число

витков (шагов) на единицу длины. Окончательно получим

$$\Delta P(\text{Вт})/\text{шаг} = (1/300)^2 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot (H_z^2 + H_\phi^2) \cdot n^{-2} \cdot 1,2556^{-2}, \quad (6)$$

где H_z, H_ϕ в кВ/см. Подставим в (6) начальное значение $H_z = 120$ кВ/см. Число шагов на единицу длины в начале спирального волновода $n = 5$. Получим для этого случая

$$\Delta P(\text{Вт})/\text{шаг} = 0,5 \text{ кВт}/\text{шаг}.$$

Вспоминая, что шаг в начале волновода равен 2 мм, найдем потери на единицу длины: $0,5 \cdot 5 = 2,5$ кВт/см, и теперь можем найти 2α — показатель экспоненты для затухания по мощности:

$$2\alpha = \Delta P/P = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}.$$

Обратная величина покажет длину, больше которой использовать для ускорения не имеет смысла. В данном случае эта длина равна

$$L = 1/2\alpha = 12 \text{ м}.$$

Следует, однако, учитывать, что в нашем случае меняется и шаг спирали, и радиус катушки, сильно меняется по длине напряженность поля H_z , так что эта оценка (12 м) носит весьма приближенный характер. Напряженность поля по длине спадает, и потери уменьшаются.

Особенно неэффективна в данном случае начальная часть спирального волновода. На оси, где находятся частицы, напряженность поля мала, так как поле в основном прижато к спирали. В этой части волновода густая катушка и особенно велико затухание введенной мощности. Видно, что частота $f = 150$ МГц не очень подходит для начальной части ускорителя на базе спирального волновода. На рис. 9 показано затухание введенной мощности в зависимости от длины спирального волновода.

Обычно нить, которой наматывается спираль, покрывают серебром. У серебра проводимость выше, чем у меди, и оно не так сильно окисляется. Толщина покрытия должна быть больше глубины скин-слоя. В рассматриваемом случае кожух расположен далеко от спирали $R/r_0 = 7,5$ и уменьшение мощности, связанное с токами, текущими по кожуху, незначительно по сравнению с затуханием в спирали. В данном случае кожух также не уменьшает напряженность поля на спирали.

При значительном заполнении структуры диэлектриком появится затухание волны, связанное с потерями в диэлектрике. Это затухание добавится к затуханию, связанному с токами, текущими по металлическим поверхностям. Можно показать, что длина затухания равна

$$\alpha = 2\pi\sqrt{\varepsilon} \cdot \text{tg } \delta/\lambda, \quad (7)$$

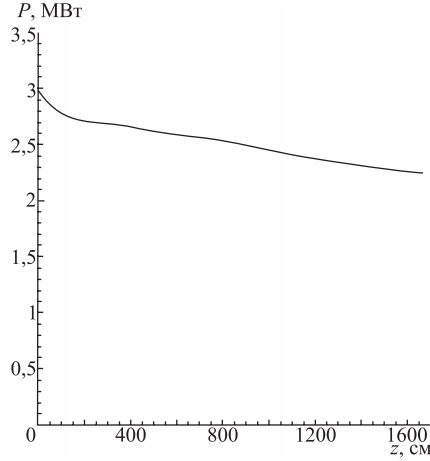


Рис. 9. Затухание по мощности

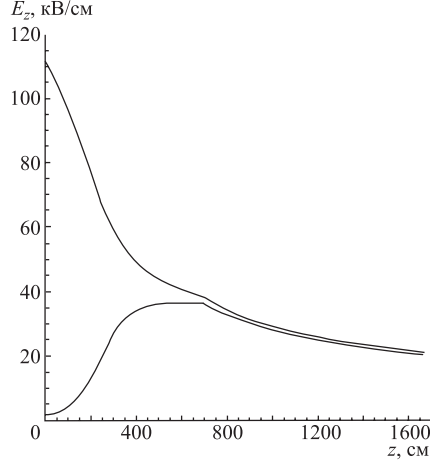


Рис. 10. Перенапряжение в спиральном волноводе. Верхняя кривая — поле на поверхности спирали, нижняя — на ее оси

где ε — диэлектрическая проницаемость, $\lambda = 2$ м — длина волны в вакууме. Потери в диэлектрике $\text{tg } \delta = 3 \cdot 10^{-4}$, и значение $\alpha = 1,3 \cdot 10^{-3}/\text{м}$ является малым для рассматриваемого случая. Оно примерно на два порядка меньше затухания, связанного с токами, текущими по металлическим поверхностям. На рис. 10 показано распределение аксиальной напряженности электрического поля на спирали в зависимости от длины спирального волновода.

В начале секции для этой частоты ($f = 150$ МГц) получилось очень большое замедление, все поле оказалось прижатым к спирали (верхняя кривая — напряженность поля на поверхности спирали), и на оси оно очень маленькое. По мере уменьшения замедления (ускорения частиц) поле от спирали отходит, а на оси растет, всегда оставаясь меньшим, чем на поверхности спирали.

Такая маленькая напряженность поля в начале ускорителя приведет к тому, что уменьшится вертикальный размах сепаратрисы, ужесточится допуск на вершину импульса напряжения на импульсном трансформаторе.

Введем, как обычно [5], относительную разность импульсов

$$g = (p - p_s)/p_s. \quad (8)$$

Тогда для g_{max} — вертикального размаха сепаратрисы — получим

$$g_{\text{max}} = 2(\Omega_c/\omega)(|1 - \phi_s/\text{tg } \phi_s|)^{1/2}. \quad (9)$$

Подставляя численные значения, найдем, что импульсный разброс $g_{\text{max}} = 4\%$, энергетический разброс в инжектируемом пучке должен быть не более

Таблица 2. Параметры второй секции спирального волновода

Ускоряемый ион: от протонов до урана Протоны: $\cos \phi_s = 0,1154$, $\phi_s = 83,4^\circ$	p , Pb^{+28} , U^{+32}
Энергия инжекции $\epsilon_{начальн}$, МэВ/нуклон	5
Начальная скорость частиц $\beta_{начальн}$, V/c	0,1
Конечная энергия $\epsilon_{конечн}$, МэВ/нуклон	8
Конечная скорость ионов $\beta_{конечн}$, V/c	0,13
Частота ВЧ-генератора f , МГц	150
Мощность ВЧ-генератора P , МВт	3
Радиус кожуха R , см	7,5
Радиус цилиндрической части спирали r_0 цилиндр, см	1
Длина цилиндрической части спирали $L_{цилиндр}$, м	13,5
Шаг спирали в начале секции $h_{начальн}$, мм	3,75
Шаг спирали в конце секции $h_{конечн}$, мм	4,5
Радиус пучка начальный $r_{начальн}$, см	0,8
Радиус пучка конечный $r_{конечн}$, см	0,8
Начальный разброс скоростей $(V_r/V_z)_{начальн}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Фокусирующее магнитное поле, Тл	6
Длина волновода $L_{общ}$, м	13,5

8 % (для $E_z = 3$ кВ/см), т. е. допуск на вершину импульса 50 кВ при напряжении на импульсном трансформаторе 625 кВ.

Малые поперечные размеры спирального волновода (диаметр кожуха 150 мм) позволяют располагать несколько секций в одном ускорительном зале, разворачивая пучок каждый раз на 180° . Размеры будут определяться диаметром фокусирующего сверхпроводящего соленоида.

На рис. 11 приведен расчетный шаг спирали для второй секции спирального волновода, в которой ионы должны ускоряться до энергии 8 МэВ/нуклон. На рис. 12 изображено распределение аксиального электрического поля на поверхности спирали и на ее оси для второй секции спирального волновода. Напряженность поля на оси спирали и на ее поверхности практически одинакова и плавно уменьшается (по мере увеличения шага спирали) в зависимости от длины спирального волновода. На рис. 13 приведена зависимость затухания мощности во второй секции спирального волновода от его длины.

Отличительной особенностью ускорения в спиральном волноводе является возможность использования короткого импульса высокочастотной мощности, так как здесь нет необходимости возбуждать высокочастотные резонаторы. Ускоритель на бегущей волне может работать в частотном режиме с частотой следования импульсов порядка 100 Гц. При длительности импульса 60 нс ионный пучок будет иметь пространственную длину порядка 2,5 м

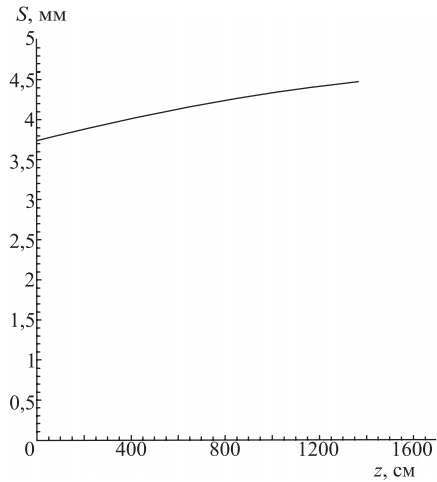


Рис. 11. Шаг винта во второй секции спирального волновода

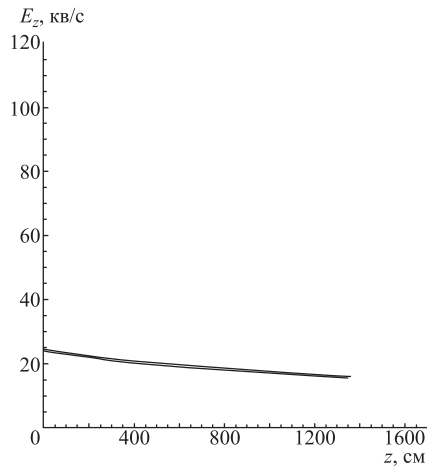


Рис. 12. Напряженность поля на поверхности спирали (верхняя кривая) и на ее оси (нижняя кривая) во второй секции спирального волновода

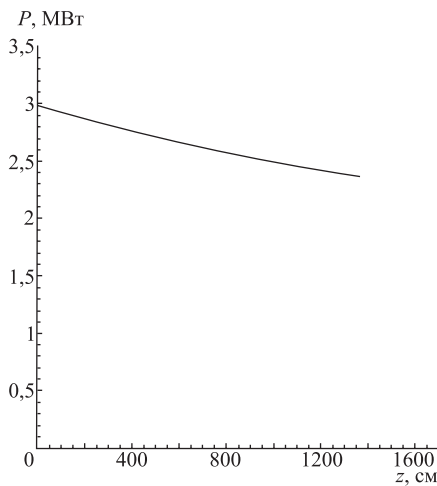


Рис. 13. Затухание во второй секции спирального волновода

(десять сгустков в пучке), и здесь открывается возможность уложить по периметру циклического ускорителя до 100 импульсов инжектируемого пучка.

Оценим величину сил кулоновского расталкивания в таком пучке. Приняв число частиц в импульсе равным $N_i = 10^8$, радиус пучка $r_b = 0,5$ см, найдем, что плотность ионов в пучке равна $n_i = 5 \cdot 10^5$ см⁻³. Электрическое поле на краю пучка определим по формуле

$$E_r = 2\pi Z e n_i r_b, \quad (10)$$

что с учетом фазовой протяженности пучка 50° дает $E_r = 0,05$ кВ/см. Это меньше радиального электрического поля ускоряющей ионы

волны, но может составить проблему для циклической машины.

Итак, если один импульс содержит 10^8 ионов, с учетом того, что система инжекции портит циркулирующий пучок, можно накопить и ускорять при хороших вакуумных условиях до $6 \cdot 10^9$ ионов/цикл.

ВЫВОДЫ

1. В спиральном волноводе эффективно ускоряются тяжелые ионы с малым отношением $Z/A = 0,1334$ при малых начальных скоростях $\beta_{\text{начальн}} = v/c = 0,01336$. Это позволит ускорять ионы Pb^{+28} , U^{+32} . Конечная энергия — 8 МэВ/нуклон — необходима для инжекции в циклический ускоритель. Короткий ВЧ-импульс позволяет работать в частотном режиме и накапливать в циклическом ускорителе до $6 \cdot 10^9$ ионов при числе ионов в одном пучке $N_i = 10^8$.

2. Радиальная фокусировка должна осуществляться внешними полями. Это может быть, например, сверхпроводящий соленоид. Дефокусирующими силами являются радиальное электрическое поле волны и силы кулоновского расталкивания, которые сильно возрастают при уменьшении радиуса пучка.

3. Спиральная система проста в изготовлении, не требует выдерживания жестких допусков и имеет очень малые поперечные размеры. Диаметр вакуумного патрубка в рассмотренном выше примере составляет 150 мм.

4. Недостатками спиральной системы являются уменьшение напряженности поля на оси с ростом фазовой скорости и большая потребляемая мощность. При одной и той же напряженности электрического поля требуемая мощность увеличивается пропорционально росту фазовой скорости в системе. При больших радиальных волновых числах растет перенапряжение в системе: напряженность поля на спирали начинает значительно превосходить напряженность поля на ее оси. Недостатком также является большое затухание мощности в начальной части спирального волновода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Файнберг Я. Б. // ЖТФ. 1959. Т. 29. С. 568.
2. Владимирский В. В. // ПТЭ. 1956. № 3. С. 35.
3. Тепляков В. А. // ПТЭ. 1964. Т. 34, № 6. С. 24.
4. Ахиезер А. И., Файнберг Я. Б. // УФН. 1951. Т. XLIV, вып. 3. С. 322.
5. Катчинский И. М. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях. М.: Атомиздат, 1966. С. 30.
6. Ахиезер А. И. и др. Теория и расчет линейных ускорителей. М.: Госатомиздат, 1962. С. 77.

Получено 31 июля 2007 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 02.11.2007.

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

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,98. Тираж 270 экз. Заказ № 55944.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/