

P9-2008-76

С. Н. Доля, К. А. Решетникова

**ДВА ВАРИАНТА ИНЖЕКЦИИ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ
В БУСТЕР НУКЛОТРОНА**

Два варианта инжекции тяжелых ионов в бустер нуклотрона

Рассматривается ускорение ионов урана с зарядом $Z = 32$ и атомной массой $A = 238$. Ускорение в первой секции спирального волновода, работающего на частоте $f_1 = 10$ МГц, начинается с энергии $W_i = 11,25$ кэВ/нуклон. Конечная энергия ионов $W_{i1} = 500$ кэВ/нуклон достигается на длине $L_1 = 2,5$ м. Мощность возбуждения волновода $P_1 = 3$ МВт, фокусирующее ионы соленоидальное магнитное поле $B_1 = 1,5$ Тл. Во второй секции, возбуждаемой на частоте $f_2 = 150$ МГц, ионы ускоряются до энергии $W_{i2} = 5,6$ МэВ/нуклон на длине $L_2 = 12,5$ м. Фокусирующее ионы магнитное поле $B_2 = 2$ Тл. Мощность возбуждения также равна $P_2 = 3$ МВт.

Ускорение ионов в последовательности коаксиальных полуволновых резонаторов начинается с энергии $W_i = 84$ кэВ/нуклон. Напряженность поля на зазорах равна $E_1 = 100$ кВ/см. Конечную энергию $W_{i1} = 500$ кэВ/нуклон ионы приобретают на длине $L_1 = 3,6$ м при прохождении 30 резонаторов. Частота возбуждения резонаторов $f_2 = 150$ МГц, мощность возбуждения каждого резонатора $P = 50$ кВт. Фокусировка пучка ионов осуществляется квадрупольными линзами, расположенными между резонаторами. Градиент магнитного поля в линзах $G = 4,8$ кГс/см. Длина H-резонатора, в котором ионы ускоряются до энергии $W_{i2} = 5$ МэВ/нуклон, равна $L_2 = 17$ м. Напряженность поля на зазорах $E_2 = 250$ кВ/см, фокусировка пучка ионов осуществляется квадрупольными линзами, расположенными внутри трубок дрейфа. Градиент магнитного поля в линзах $G = 7,25$ кГс/см.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2008

Two Variants of Injection of Heavy Ions into the Nuclotron Booster

The acceleration of uranium ions with the charge $Z = 32$ and atomic mass $A = 238$ is discussed. In the first section of the spiral waveguide working at the frequency $f_1 = 10$ MHz with the RF power $P = 3$ MW, ions are accelerated from $W_i = 11.25$ keV/nucleon to $W_{i1} = 500$ keV/nucleon on the length $L_1 = 2.5$ m. The magnetic field focusing ions $B_1 = 1.5$ T. The second section working at the frequency $f_2 = 150$ MHz has the length $L_2 = 12.5$ m. The focusing magnetic field $B_2 = 2$ T. The final energy of ions $W_{i2} = 5.6$ MeV/nucleon.

The acceleration of ions in coaxial resonators begins from the energy $W_i = 84$ keV/nucleon to $W_{i1} = 500$ keV/nucleon on the length $L_1 = 3.6$ m after crossing 30 resonators. The RF power of each resonator $P = 50$ kW, frequency $f_2 = 150$ MHz, high voltage on each gap $E_1 = 100$ kV/cm. Focusing of the ion beam is realized by quadrupole magnetic lenses between the resonators. The gradient of the magnetic field $G = 4.8$ kGs/cm. The final energy of the accelerated ions $W_{i2} = 5$ MeV/nucleon is achieved in the H-resonator, which has the length $L_2 = 17$ m, high voltage on each gap $E_1 = 250$ kV/cm, frequency $f_2 = 150$ MHz. Focusing of the ion beam is realized by quadrupole magnetic lenses inside the drift tube, the gradient magnetic field $G = 7.25$ kGs/cm.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2008

1. СПИРАЛЬНЫЙ ВОЛНОВОД

Интерес к экспериментам с тяжелыми ионами стимулирует поиск замедляющих структур, пригодных для эффективного ускорения ионов.

Один из вариантов получения замедленной волны — спиральный волновод, обладающий рядом достоинств. Прежде всего следует отметить малые поперечные размеры спирального волновода, что позволяет использовать для фокусировки пучков соленоидальное магнитное поле. Диаметр внешнего цилиндра вакуумного кожуха волновода выбирается скорее из условий скорости откачки, чем из электродинамических свойств структуры. У спирального волновода в широкой области частот практически отсутствует дисперсия, то есть нет зависимости фазовой скорости волны от частоты.

Недостатками спирального волновода являются: малый шаг намотки спирали, необходимый при больших замедлениях, и большое перенапряжение — превышение напряженности поля на спирали над полем на ее оси. Для сохранения синхронизма между волной и ускоряемыми частицами необходимо увеличивать шаг спирали при продвижении вдоль оси волновода. Это приводит к тому, что все большая часть мощности распространяется вне спирали, между спиралью и кожухом, поле на оси уменьшается и спираль как ускоряющая структура становится неэффективной.

Частично эти недостатки можно преодолеть, если наматывать спираль на конусный каркас с уменьшающимся радиусом. Это приводит к увеличению шага намотки в месте ввода мощности (в начале спирального волновода), уменьшению перенапряжения и сохранению эффективности ускорения на значительной части спирали.

В качестве примера рассмотрим две секции спирального волновода, возбуждаемые на частотах $f_1 = 10$ МГц и $f_2 = 150$ МГц. Начальную фазовую скорость выберем $\beta_{\text{фаз}} = 5 \cdot 10^{-3}$, соответствующее напряжение на трубке равно $U = 90$ кВ для рассматриваемых ионов урана с зарядом $Z = 32$ и атомной массой $A = 238$. Конечная энергия ионов — 5,6 МэВ/нуклон, общая длина ускорителя — 16 м. На рис. 1 показан общий вид секции спирального волновода.

Далее будут приведены результаты численного моделирования фокусировки и ускорения частиц в структуре, состоящей из ионного источника, ускорительной трубки, группирователя и двух секций спирального волновода,



Рис. 1. Общий вид секции спирального волновода

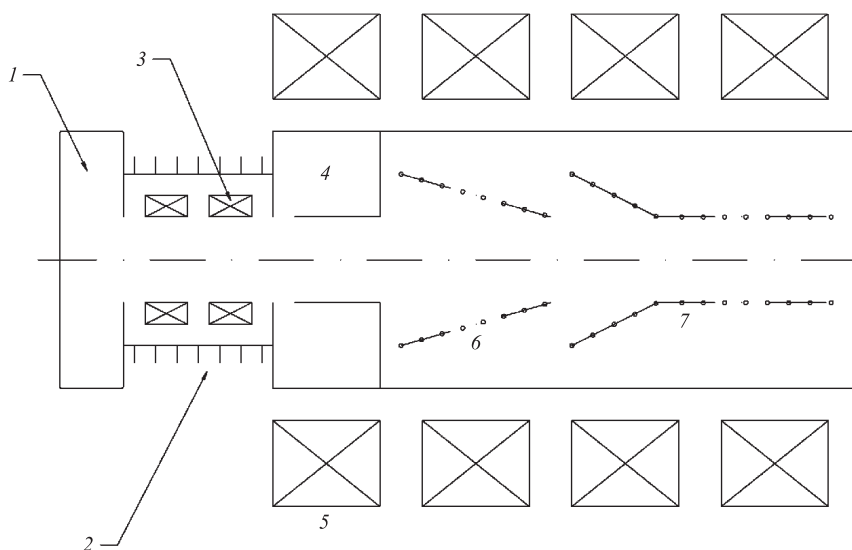


Рис. 2. Схема ускорителя: 1 — ионный источник; 2 — ускорительная трубка; 3 — фокусирующие триплеты на постоянных магнитах; 4 — группирователь; 5 — катушки фокусирующего соленоида; 6 — первая секция спирального волновода, возбуждаемая на частоте $f_1 = 10$ МГц; 7 — вторая секция волновода, частота $f_2 = 150$ МГц

работающих на частотах $f_1 = 10$ МГц и $f_2 = 150$ МГц. Схема предлагаемого ускорителя приведена на рис. 2.

Ускоритель на бегущей волне может работать в частотном режиме с частотой посылок 100 Гц и длительностью ВЧ-импульса $\tau = 1$ мкс. Возмож-

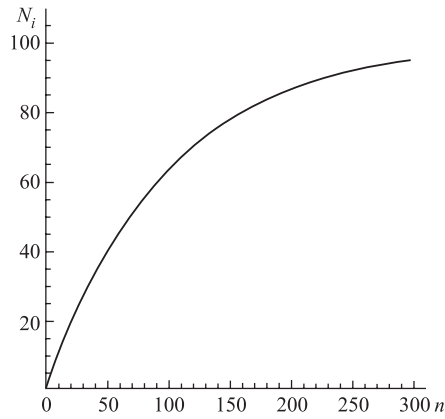


Рис. 3. Кривая, отражающая накопление пучка ионов в бустере N_i/N_0 (N_0 — интенсивность пучка линейного ускорителя) в зависимости от числа инжектируемых импульсов

ность использования короткого импульса высокочастотной мощности основана на том, что здесь нет необходимости возбуждать высокодобротные резонаторы. При длительности импульса тока пучка 100 нс открывается возможность уложить по периметру циклического ускорителя до 100 импульсов инжектируемого пучка. При длительности импульса тока пучка 100 нс ускоритель будет работать в одноступенчатом режиме и, при постоянном поле в бустере, возможно накопление десятков импульсов тока от линейного ускорителя.

Предположим, что ионный источник способен выдавать $N_i = 10^8$ част./имп. с частотой 100 Гц при длительности импульса 100 нс. Просто так накопить $N_i = 10^{10}$ частиц за 100 импульсов, тем не менее, не удастся. Дело в том, что при инжекции каждого следующего сгустка из линейного ускорителя будет «портиться» уже накопленный пучок. Собственно процесс накопления описывается дифференциальным уравнением:

$$dN_i/dn = N_0 - \alpha N_i, \quad (1)$$

где N_i — интенсивность накопленного пучка; $N_0 = 10^8$ — интенсивность инжектируемого пучка; $\alpha = 10^{-2}$ — коэффициент потерь пучка при инжекции следующей порции; $n = 1, 2, 3$ — количество инжектируемых импульсов из линейного ускорителя. Если бы не было потерь, то интенсивность N_i — накопленного пучка за 100 импульсов (физическое время равно $t = 1$ с) — была бы равна $N_i = 10^{10}$. С учетом потерь эта интенсивность за 100 импульсов меньше: $N_i = 6 \cdot 10^9$, предполагается, что потерь частиц за время $t = 1$ с в бустере из-за плохого вакуума не будет. На рис. 3 приведена зависимость

накопления числа ионов в бустере от времени. Коэффициент потерь пучка α при инжекции каждой следующей порции положен равным $\alpha = 10^{-2}$.

Заметим, что если ионный источник выдаст $2 \cdot 10^9$ ионов в импульсе длительностью 7 мкс (предполагаемое время одного оборота в бустере), то необходимости работать в частотном режиме не будет.

1.1. Модель пучка и ускорительная трубка. Предполагается, что ионы будут инжектироваться в ускоритель из электронно-лучевого источника [1, 2]. Возьмем следующие параметры пучка: радиус пучка $r_0 = 0,5$ см, максимальная радиальная скорость в пучке $\beta_r < 2 \cdot 10^{-5}$. Тогда произведение $\pi r_0 \beta_r$ равно $\pi r_0 \beta_r = 0,1\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$, что близко к экспериментально измеренному нормализованному эмиттансу [2]. Интенсивность ионов из источника в коротком импульсе $\tau = 100$ нс пусть составляет $N_i = 10^8$ ионов/имп. Вытягивающее напряжение из источника примем равным $U = 10$ кВ. Далее ионы попадают в ускорительную трубку с постоянным градиентом электрического поля E_z , выбранным так, чтобы обеспечить радиальную фокусировку ионного пучка, вытягиваемого из источника.

Трубку возьмем с постоянным градиентом $\alpha = 0,4$ кВ/см² и длиной 20 см, чтобы поле на ней возросло от начального $U = 10$ кВ до конечного $U = 90$ кВ, это так называемое поле с растущим градиентом потенциала вдоль ускорительной трубки. Тогда фокусирующее ускоряемое ионы поле $E_{r\text{фокус}} = (r/2)dE_z/dz = 100$ В/см. Это меньше кулоновского дефокусирующего поля, но, тем не менее, значительного разлета пучка за время пролета трубки не происходит. С ростом радиуса пучка расталкивающее кулоновское поле уменьшается, а фокусирующее $E_{r\text{фокус}}$ растет и радиус пучка выходит на стационарное значение. Ток пучка ионов $I_i = ZN_i/\tau = 5$ мА. Зависимость радиального размера пучка при пролете сквозь трубку приведена на рис. 4.

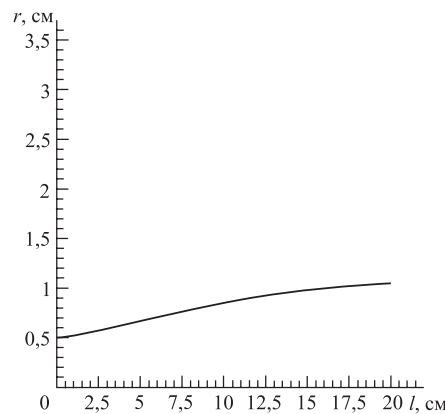


Рис. 4. Зависимость радиуса пучка от длины при пролете через ускорительную трубку

1.2. Первая секция спирального волновода, возбуждаемая на частоте $f_1 = 10$ МГц. Ионы урана с зарядом $Z = 32$, прошедшие разность потенциалов $U = 90$ кэВ (энергия ионов $E = 12,1$ кэВ/нуклон), имеют относительную скорость порядка

$$\beta_z = (2ZeU/AM_p c^2)^{1/2} = 5 \cdot 10^{-3}. \quad (2)$$

Такой же должна быть начальная фазовая скорость волны в спиральном волноводе, что однозначно определяет шаг и радиус спирали. Увеличение фазовой скорости (увеличение шага спирали при заданном радиусе) определяется темпом ускорения, фактически E_z -полем, вычисляемым из вектора потока мощности с учетом затухания в спирали.

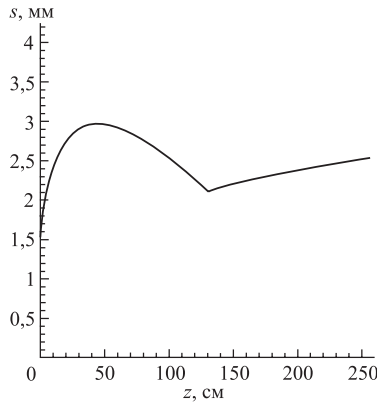


Рис. 5. Расчетный шаг спирали в первой секции волновода

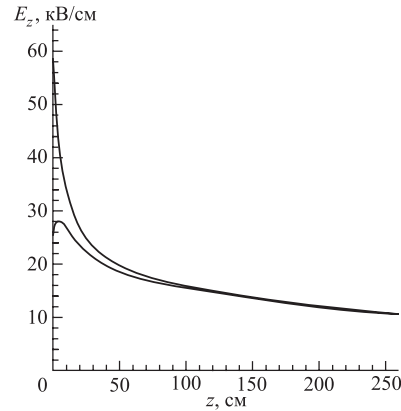


Рис. 6. Распределение продольного электрического поля в зависимости от продольной координаты в первой секции. Верхняя кривая — напряженность поля на спирали, нижняя — на ее оси. Частота $f_1 = 10$ МГц

Двухзазорный группирователь с напряжением на зазорах 3,5 кВ переводит пучок из начальной области фаз $+90^\circ$ в конечную область фаз $+15^\circ$ на длине 62 см, таким образом, эффективность группировки будет равна 50%. При добротности контура $Q = 100$ потребляемая мощность будет равна $P = 35$ Вт. Длина трубки дрейфа в группирователе равна 7 см, он содержит два зазора по 0,5 см. Фокусирующее магнитное поле в области группирователя равно $B = 1,5$ Тл. Поле должно иметь такое же направление,

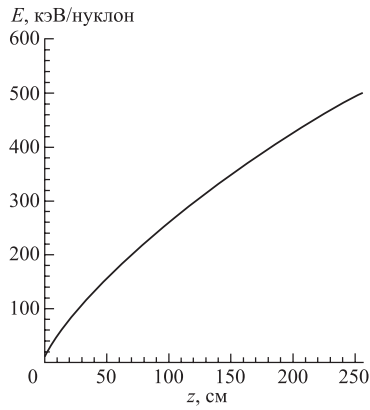


Рис. 7. Кривая набора энергии в первой секции в зависимости от продольной координаты

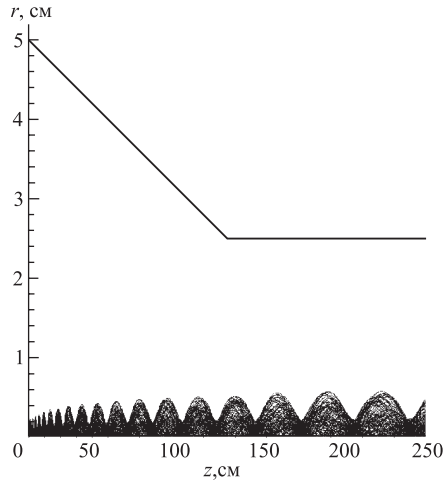


Рис. 8. Радиальный размер пучка в первой секции спирального волновода. Верхняя кривая — профиль каркаса, на который намотана спираль. Фокусирующее ионы поле: $B = 1,5$ Тл

как и в ионном источнике, чтобы не устраивать каспа-области, где частицы эффективно переводят свою скорость из поступательной во вращательную.

На рис. 5 приведен расчетный шаг спирали в первой секции. Для увеличения шага спирали на начальном участке (в месте ввода мощности) и уменьшения напряженности электрического поля в этом месте профиль каркаса, на который наматывается спираль, выбран конусным. Начальный радиус намотки спирали — 5 см, длина конусной части — 1,25 м, конечный радиус намотки спирали — 2,5 см, длина цилиндрической части спирального волновода — 1,25 м, общая длина первой секции — 2,5 м, вводимая мощность $P = 3$ МВт.

На рис. 6 приведено распределение электрического поля вдоль первой секции спирального волновода. Нижняя кривая — поле на оси, верхняя — на спирали. На рис. 7 приведен набор энергии ионами в первой секции в зависимости от длины спирального волновода. На рис. 8 показано радиальное движение частиц пучка. Там же верхняя ломаная кривая — это профиль намотки спирали. Видно, что радиус пучка все время остается меньше радиуса спирали.

Вторая секция спирального волновода должна работать на частоте $f_2 = 150$ МГц, что в 15 раз выше, чем частота в первой секции. Для фазового движения это означает, что масштаб (размер потенциальной ямы) сокращается

Таблица 1. Параметры первой секции спирального волновода

Начальный радиус спирали, см	5
Конечный радиус спирали, см	2,5
Длина конусной части спирального волновода, м	1,25
Длина цилиндрической части спирального волновода, м	1,25
Рабочая частота f_1 , МГц	10
Начальный шаг спирали, мм	1,5
Конечный шаг спирали, мм	2,5
Радиус внешнего цилиндра, см	7,5
Мощность возбуждения, МВт	3
Общая длина первой секции спирального волновода, м	2,5
Фокусирующее магнитное поле, Тл	1,5
Начальная энергия ионов, кэВ/нуклон	11,5
Конечная энергия ионов, кэВ/нуклон	500
Средний темп набора энергии, кэВ/м-нуклон	200

в 15 раз. На рис. 9. приведена фазовая протяженность сгустка в зависимости от продольной координаты. Колебания аperiodические, начальная фазовая ширина сгустка $\sim 30^\circ$, конечная — порядка 1° .

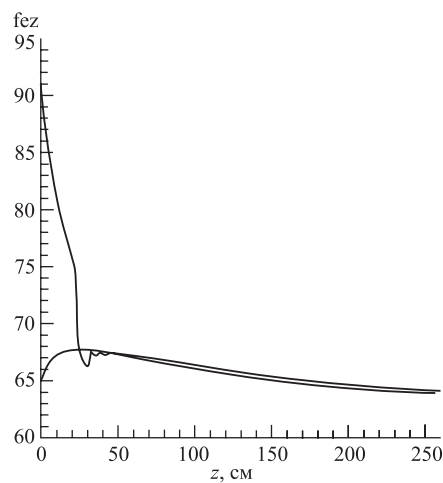


Рис. 9. Фазовое движение в первой секции

1.3. Вторая секция спирального волновода, возбуждаемого на частоте $f_2 = 150$ МГц. Во второй секции спирального волновода, так же как и

в первой, необходимый для ускорения шаг спирали определялся через набор энергии в электрическом поле волны, вычисляемом из потока введенной энергии. Шаг выбирался так, чтобы синхронная частица находилась в одной и той же фазе (синхронной) и непрерывно ускорялась полем замедленной бегущей волны. Начальная фазовая скорость волны выбрана равной $\beta_{\text{ф}} = 0,03$, конечная — $\beta_{\text{ф}} = 0,1$. Начальный радиус намотки — 1,25 см, конечный — 0,7 см. Вводимая мощность $P = 3$ МВт, длина второй секции спирального волновода $l = 12,7$ м.

На рис. 10 показана зависимость расчетного шага спирали от продольной координаты в волноводе.

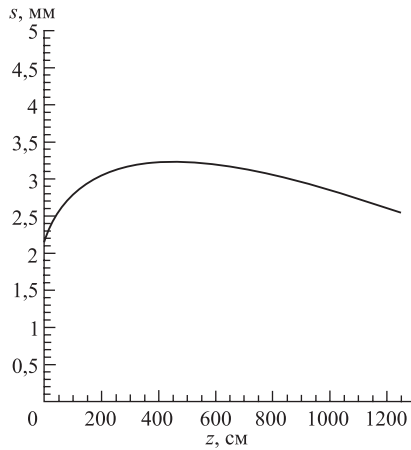


Рис. 10. Расчетный шаг спирали

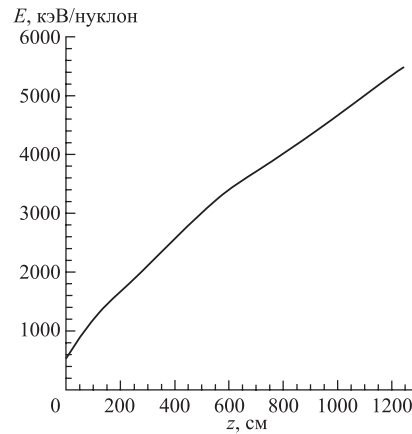


Рис. 11. Зависимость роста энергии ионов от продольной координаты

Видно, что шаг намотки спирали сначала увеличивается в соответствии с темпом набора энергии ионами, потом уменьшается. Само значение шага спирали лежит в пределах $h = 2,2\text{--}3,2$ мм.

На рис. 11 показана зависимость увеличения энергии ионов от продольной координаты в волноводе. Начальная фазовая скорость $\beta_{\text{ф}} = 0,03$ соответствует энергии ионов 500 кэВ/нуклон, конечная — $\beta_{\text{ф}} = 0,1$ — энергии ионов 5,0 МэВ/нуклон, типичной для инжекторов в циклические ускорители. Видно, что такой набор энергии получается на длине ускорителя, равной $L = 12,7$ м.

Распределение продольного, ускоряющего частицы поля показано на рис. 12. Благодаря конусному профилю каркаса, на который намотана спираль, напряженность поля на спирали в месте ввода мощности — порядка 75 кВ/см, спад напряженности поля на оси слабый, напряженность поля в конце ускорителя — более 25 кВ/см. Конечная энергия ионов — 5,6 МэВ/нуклон.

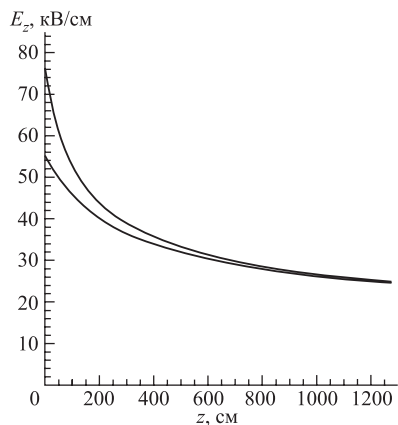


Рис. 12. Распределение продольного поля вдоль оси ускорителя. Верхняя кривая — напряженность поля на спирали, нижняя — на ее оси

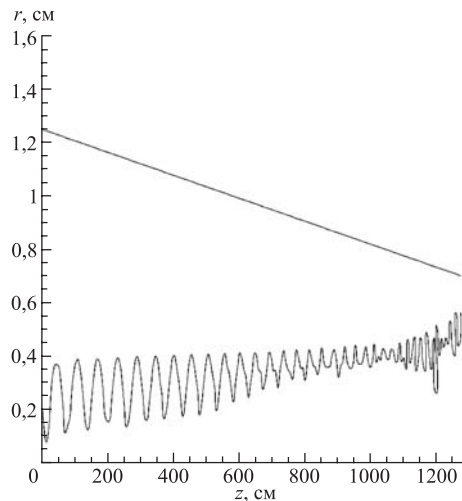


Рис. 13. Радиальное движение частиц при ускорении во второй секции спирального волновода. Фокусирующее поле $B = 2$ Тл

Таблица 2. Параметры спирального волновода, возбуждаемого на частоте $f_2 = 150$ МГц

Начальный радиус намотки, см	1,25
Конечный радиус намотки, см	0,7
Начальный шаг винта, мм	2,2
Конечный шаг винта, мм	2,5
Радиус кожуха, см	7,5
Вводимая мощность, МВт	3
Общая длина волновода, м	12,7
Фокусирующее магнитное поле, Тл	2
Средний темп ускорения кэВ/м·нуклон	340

Видно, что благодаря конусной части намотки напряженность поля по длине волновода спадает достаточно плавно. Средняя амплитудная напряженность поля превосходит 25 кВ/см, что позволяет ионам эффективно набирать энергию. Максимальная напряженность на поверхности спирали не превосходит 75 кВ/см.

На рис. 13. показано радиальное движение частиц в зависимости от продольной координаты.

Приведем основные результаты.

Для заданной мощности генератора ($P = 3$ МВт) находилась амплитуда волны, и каждый раз шаг спирали подбирался таким, чтобы синхронная частица ($\phi_s = 65^\circ$, $\cos\phi_s = 0,9$) ускорялась с темпом, определяемым напряженностью поля на оси спирали. Таким способом для двух значений частоты рассчитаны радиус намотки и шаг спирали.

Замедление в системе оказалось близким к тому, что дает простое приближение $v_\phi = c \cdot \operatorname{tg}\psi \ll 1$, где c — скорость света, а $\operatorname{tg}\psi$ — тангенс угла намотки спирали, равный отношению шага намотки h к $2\pi R$ — периметру витка: $\operatorname{tg}\psi = h/2\pi R \ll 1$.

Это соотношение имеет простой смысл: отношение фазовой скорости к скорости света в вакууме равно отношению путей, проходимых волной вдоль спирали и вдоль ее оси. Влияние кожуха (вакуумного патрубка), диэлектрика между кожухом и спиралью и частичное заполнение диэлектриком пространства внутри спирали приводит к небольшим изменениям шага спирали.

Напряженность поля в такой системе падает от начала к концу спирали, но при выбранных параметрах в конце остается достаточно высокой ~ 25 кВ/см. Структура поля в спиральном волноводе является растущей от оси системы к спирали, и перенапряжение (отношение поля на спирали к полю на оси) быстро увеличивается с ростом радиальной безразмерной переменной $x = k_1 R = 2\pi R/\lambda_{\text{замедл}}$, где $\lambda_{\text{замедл}}$ — длина волны в системе.

Поперечные размеры сгустков — $r_0 = 0,5$ см; фокусирующее магнитное поле: в области группирователя и первой секции спирального волновода $B = 1,5$ Тл, в области второй секции $B = 2$ Тл.

Разработана математическая модель ускорителя тяжелых ионов на базе спирального волновода. Значительный процент (50 %) частиц, вышедших из ионного источника, ускорились и приобрели энергию 5,6 МэВ/нуклон. Общая длина ускорителя — 16 м.

2. РЕЗОНАТОРНЫЕ СТРУКТУРЫ

2.1. Модель пучка и его прохождение через ускорительную трубку с фокусировкой пучка постоянными магнитами. При ускорении тяжелых ионов с помощью высокочастотных резонаторов времена пролета ионами ускоряющих зазоров получаются большими, что приводит к необходимости использования низких частот. В результате размеры резонаторов оказываются недопустимо большими, так четвертьволновый коаксиальный резонатор на частоту 10 МГц будет иметь длину 7,5 м, такого же порядка (для достижения высокой добротности) должны быть и поперечные размеры. При работе на частотах порядка 150 МГц необходимы сравнительно большие начальные скорости

ионов. Ниже будет рассмотрен случай, когда напряжение на ускорительной трубке равно $U = 625$ кВ.

Эффективным источником многозарядных ионов является электронно-лучевой источник ионов [1]. Ионы в нем образуются и удерживаются в поле электронной струны, удерживаемой в радиальном направлении продольным магнитным полем.

Предположим, что относительные радиальные скорости частиц в таком источнике $\beta_r \sim 2 \cdot 10^{-5}$, вытягивающее ионы напряжение $U = 10$ кВ; число ионов в импульсе $N_i = 2 \cdot 10^9$; длительность импульса $\tau = 8$ мкс. Заряд ионов положим равным $Z = 32$, атомный вес — $A = 238$. Радиус пучка ионов положим равным $r_0 = 5$ мм, частицы равномерно распределены внутри круга с этим радиусом и имеют случайные скорости не более некоторой $\beta_r = + - 2 \cdot 10^{-5}$.

Известно [2], что в таком источнике с одинаковой интенсивностью присутствует примерно пять зарядностей, расположенных симметрично относительно средней так, что число ионов с зарядом $Z = 30, 31, 33$ и 34 предполагается таким же, как у $Z = 32$. Общее число выведенных из источника ионов равняется, таким образом, $N_i = 10^{10}$.

Предлагается поставить прямо в трубке постоянные магниты из материала NdFeB. Градиенты для фокусировки требуются небольшие, магниты питания не требуют. Это очень похоже на структуру с трубками дрейфа, только за время пролета трубки дрейфа (области, где есть магнитное поле и нет электрического), направление электрического поля не изменяется. Вариант расстановки линз вдоль ускорительной трубки и градиенты в линзах, показан на рис. 14.

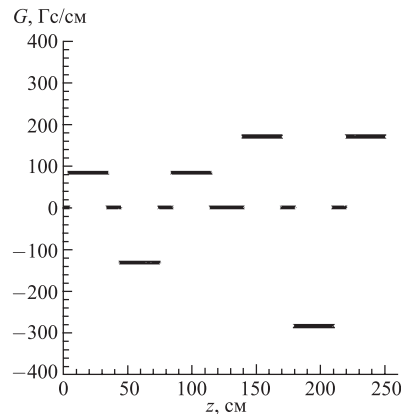


Рис. 14. Распределение градиентов магнитного поля вдоль ускорительной трубки. Длина трубок дрейфа — 300 мм, длина ускоряющих зазоров — 100 мм

Таблица 3. Градиенты и распределение напряженности электрического поля вдоль ускорительной трубки

Длина, см	Напряженность электрического поля, кВ/см	Градиенты магнитного поля в квадрупольных линзах, Гс/см
5 (уск. зазор)	15	0
30 (магн. линза)	0	95,7
10 (уск. зазор)	20	0
30 (магн. линза)	0	-124,44
10 (уск. зазор)	20	0
30 (магн. линза)	0	95,7
25 (уск. зазор)	15	0
30 (магн. линза)	0	191,22
10 (уск. зазор)	20	0
30 (магн. линза)	0	-294,65
10 (уск. зазор)	20	0
30 (магн. линза)	0	191,22

Таблица 4. Параметры ионного пучка, проходящего сквозь ускорительную трубку

Зарядность ионов Z	$Z = 30-34$
Число ионов в импульсе N_i	$2 \cdot 10^9$, для каждой зарядности
Длительность импульса τ , мкс	8
Максимальная поперечная скорость ионов β_r	$2 \cdot 10^{-5}$
Максимальная энергия хаотического движения $Mc^2\beta_r^2/2$, эВ	48
Радиус пучка ионов r_0 , см	0,5
Вытягивающее ионы напряжение, кВ	10
Относительная продольная скорость ионов β_z	$1,7 \cdot 10^{-3}$
Атомная масса ионов A	238

Общая длина ускорительной трубки — 2500 мм, к ней приложена разность потенциалов 625 кВ.

При этом удается провести пучок на расстояние 2500 мм, до выхода из ускорительной трубки без существенного увеличения радиуса пучка.

На рис. 15. показана огибающая пучка в ускорительной трубке. Радиус пучка на выходе — порядка начального, $r_0 = 0,5$ см.

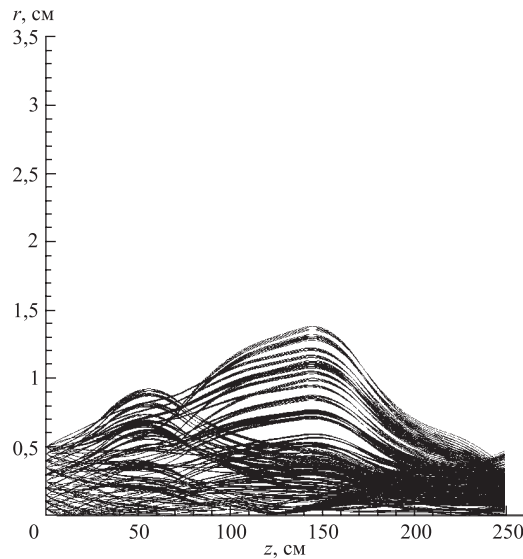


Рис. 15. Зависимость радиуса пучка от длины в ускорительной трубке, в которую встроены два фокусирующих триплета квадрупольных магнитных линз. Радиус пучка на выходе из трубки такой же, как на входе в трубку

2.2. Резонансный предускоритель на базе последовательности коаксиальных полуволновых резонаторов. Одной из эффективных структур для ускорения тяжелых ионов является последовательность из одиночных полуволновых коаксиальных резонаторов, в каждом из которых амплитуда напряжения и фаза поля могут устанавливаться независимо. Будем рассматривать структуру из 30 резонаторов, настроенных на частоту $f_2 = 150$ МГц. Начальную относительную скорость ионов урана с зарядом $Z = 32$ и атомной массой $A = 238$ возьмем такой, какая получается после ускорительной трубки с разностью потенциалов $U = 625$ кВ, $\beta_{\text{начальн}} = 0,013$. Длительность импульса тока примем равной $\tau = 8$ нс, число ионов N_i в импульсе возьмем $N_i = 10^{10}$, фазовую протяженность ступки — $\Delta\phi = + - 15^\circ$. На рис. 16 приведена схема предускорителя.

Длину всех зазоров положим равной $l = 1$ см, диаметр трубок дрейфа и полутрубок (образующих ускоряющие промежутки) возьмем равным 2 см. Расстояние между центрами зазоров равно, как обычно, $\beta\lambda/2$, и эта величина непрерывно увеличивается по мере ускорения частиц. Фокусирующие элементы предполагается разместить в пространстве между резонаторами. Видно (из рис. 16), что протяженность магнитной квадрупольной линзы равна 5 см. На рис. 17 приведен вид сверху одной из полусекций резонансного предуско-

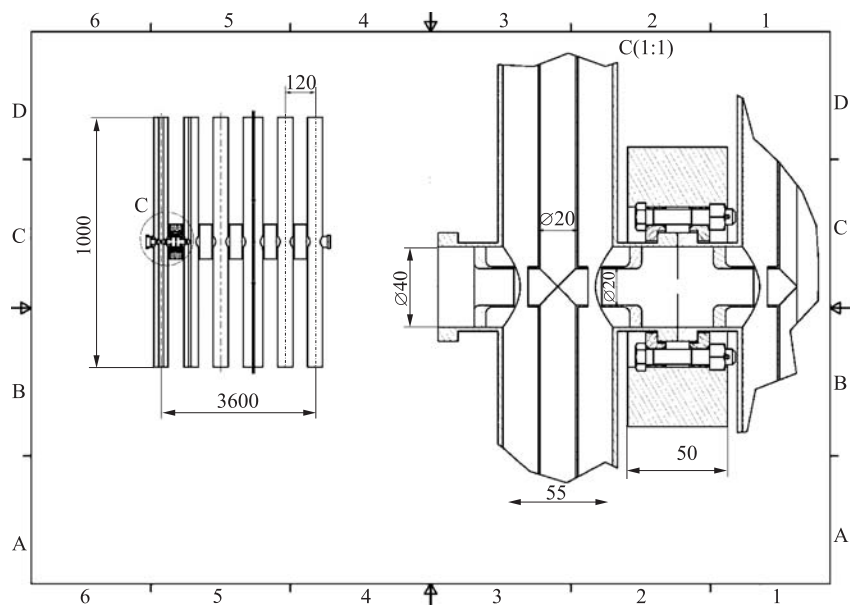


Рис. 16. Схема резонансного предускорителя ионов

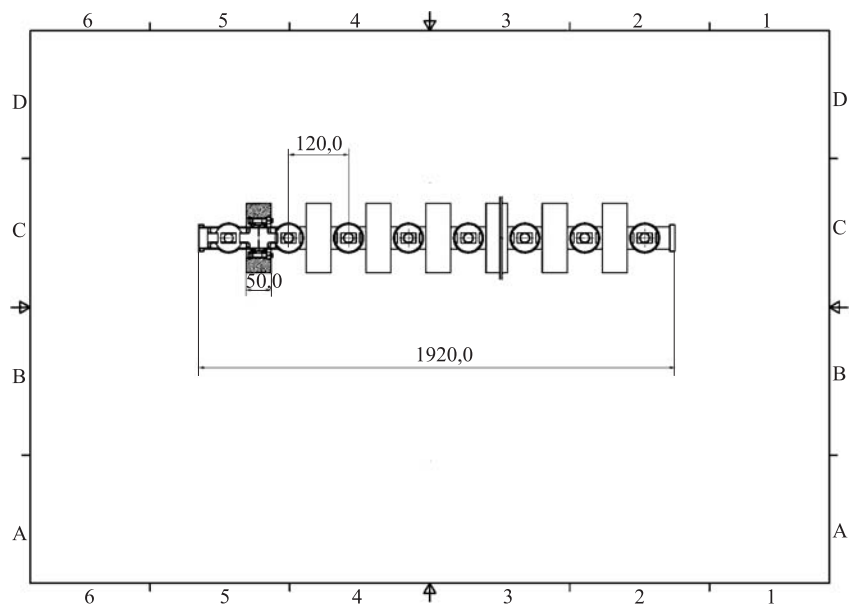


Рис. 17. Вид сверху резонансного предускорителя

рителя. Для выбранной длины волны $\lambda = 2$ м, высота полуволновых резонаторов составит 1 м. Диаметр наружного коаксиала равен 60 мм, диаметр внутреннего проводника равен 20 мм, резонаторы соединены между собой цилиндрами с диаметром 40 мм. Период структуры — 120 мм, длины трубок дрейфа — менее 40 мм.

На рис. 18 дан общий вид полусекции резонансного предускорителя. Ускоритель содержит 30 независимо возбуждаемых полуволновых коаксиальных резонаторов, настроенных на частоту $f_2 = 150$ МГц. Амплитуда и фаза в каждом из резонаторов могут подбираться независимо, возможно плавное регулирование энергии (уменьшение), осуществляемое путем отключения части резонаторов. Общая длина резонансного предускорителя тяжелых ионов равна 3,6 м.

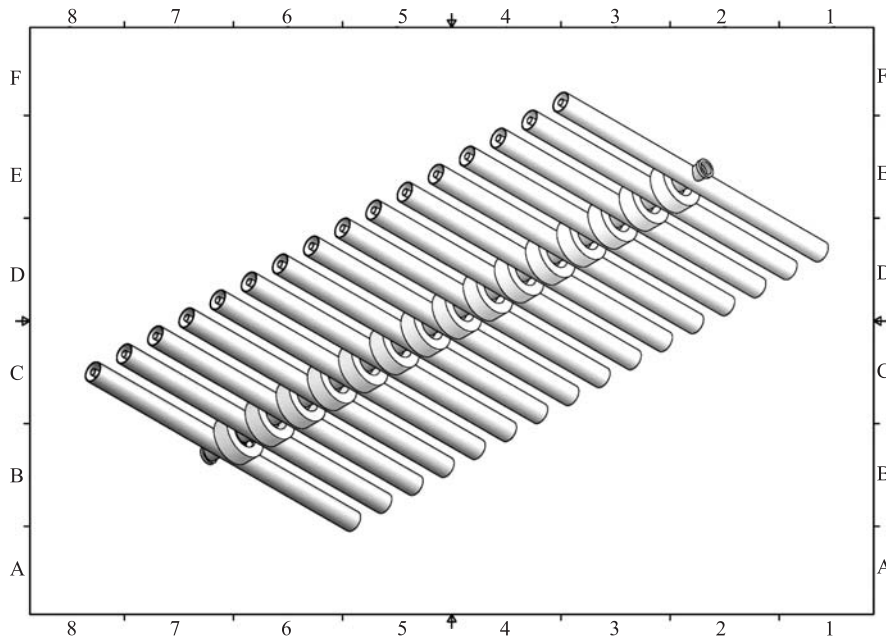


Рис. 18. Общий вид полусекции резонансного предускорителя тяжелых ионов

Оценки шунтового сопротивления показывают, что оно равно $R_{\text{шунт}} = 100$ кОм/резонатор. Это означает, что при вводимой в каждый резонатор мощности $P = 50$ кВт амплитуда напряжения на зазорах будет равна $U = 100$ кВ. На рис. 19 приведен график набора энергии частицами в зависимости от длины структуры. Синхронная фаза выбрана такой, что $\cos \phi_s = 0,9$.

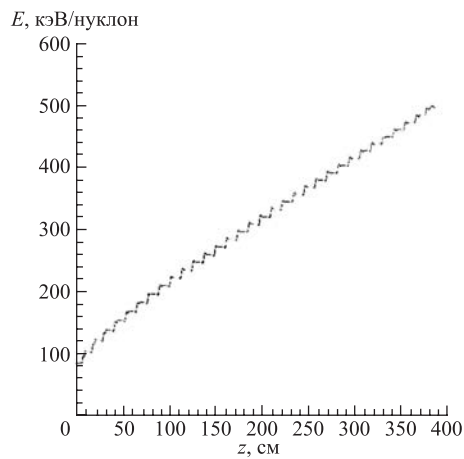


Рис. 19. Набор энергии ионами в резонансном предускорителе

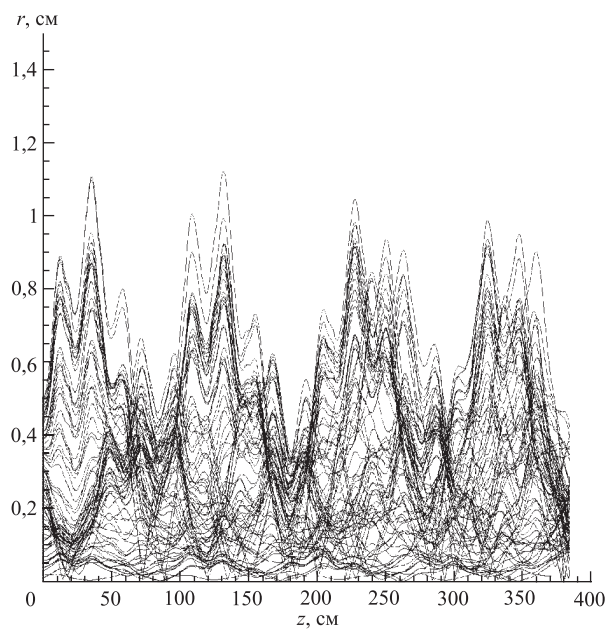


Рис. 20. Радиальное движение ионов в резонансном предускорителе

Видно, что энергия порядка 500 кэВ/нуклон, достаточная для дальнейшего ускорения в Н-резонаторе или секции спирального волновода, набирается при этом на длине 3,6 м.

На рис. 20 приведен график радиального движения частиц в таком пре-дускорителе. Градиенты магнитного поля в линзах, расположенных между резонаторами, равны $G = 4,8$ кГс/см.

Видно, что при градиенте магнитного поля в квадрупольных линзах порядка 5 кГс/см удается провести пучок без потерь и получить конечный размер пучка $r_0 = 0,5$ см порядка начального.

2.3. Ускорение тяжелых ионов с помощью многозазорного резонатора с трубками дрейфа. Для достижения тяжелыми ионами энергии порядка 5 МэВ/нуклон можно использовать резонатор с трубками дрейфа. Рассмотрим резонатор, содержащий 148 трубок дрейфа. Величину зазора возьмем постоянной: $l = 1$ см, длина трубок дрейфа должна возрасти в соответствии с соотношением $l_{\text{трубки}} = \beta\lambda/2 - 1$ см, напряжение на зазорах примем равным $U_{\text{зазора}} = 250$ кВ.

На рис. 21 приведен набор энергии ионами с зарядом $Z = 32$ и атомной массой $A = 238$ в таком резонаторе. Видно, что конечная энергия 5 МэВ/нуклон набирается при этом на длине $L = 14$ м.

На рис. 22 приведена огибающая пучка ионов при его движении вдоль резонатора. Фокусирующие линзы размещены в трубках дрейфа. Градиент магнитного поля в линзах — 7,25 кГс/см.

Видно, что радиальный размер пучка в этом случае не более 1 см.

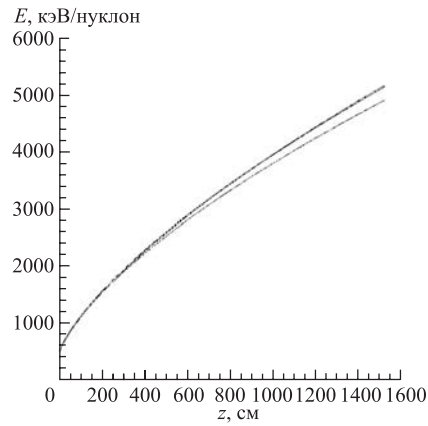


Рис. 21. Зависимость набора энергии в Н-резонаторе от длины резонатора. Нижняя кривая — синхронная фаза $\phi_s = 60^\circ$, две верхние кривые — 70° и 80° градусов соответственно

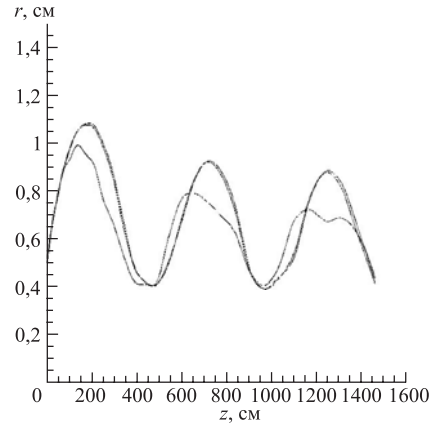


Рис. 22. Огибающая пучка в случае синхронной фазы, равной $\phi_s = 60^\circ$, нижняя кривая; 70° и 80° — две верхние кривые соответственно

ЛИТЕРАТУРА

1. *Donets E. D., Ovsyannikov V. P.* // Sov. Phys. JETP. 1981. V. 53. P. 466.
2. *Pikin A. et al.* // Proc. of EPAC 2002, Paris, France.
3. *Доля С. Н., Решетникова К. А.* Сообщение ОИЯИ Р9-2007-120. Дубна, 2007.

Получено 23 мая 2008 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 05.09.2008.

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

Усл. печ. л. 1,31. Уч.-изд. л. 1,52. Тираж 270 экз. Заказ № 56291.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/