

P9-2015-90

С. Н. Доля

МНОГОПУЧКОВЫЙ ПРОТОННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ

Доля С. Н.

P9-2015-90

Многopучковый протонный ускоритель

Рассмотрен ускоритель протонов, содержащий семь независимых пучков, расположенных по радиусу. Ток в каждом пучке равен $I_p = 0,1$ А. Начальная часть ускорителя состоит из экранированных спиральных волноводов, заключенных в общий кожух. Частота ускорения $f = 300$ МГц, высокочастотная мощность $P = 25$ МВт, длина ускорителя $L_{acc1} = 6$ м. После достижения протонами энергии $W_{p1} = 6$ МэВ протоны с помощью линз с азимутальным магнитным полем сводятся в один пучок, и его дальнейшее ускорение производится в последовательности сверхпроводящих резонаторов, настроенных на частоту $f = 1,3$ ГГц. Темп ускорения равен 20 МэВ/м, длина основной части ускорителя $L_{acc2} = 50$ м, потребляемая высокочастотная мощность $P = 15$ МВт/м.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2015

Dolya S. N.

P9-2015-90

A Multibeam Proton Accelerator

The paper considers a proton accelerator containing seven independent beams arranged over the accelerator radius. The current in each beam is $I_p = 0.1$ A. The initial part of the accelerator consists of shielded spiral waveguides assembled in a common screen. The main parameters of the accelerator are as follows: the acceleration frequency $f = 300$ MHz, the high-frequency power $P = 25$ MW, and the accelerator's length $L_{acc1} = 6$ m. Upon reaching the proton energy $W_{p1} = 6$ MeV, the protons are assembled together into one beam using lenses with an azimuthal magnetic field. Further, the beam acceleration is performed in an array of superconducting cavities tuned to the frequency $f = 1.3$ GHz. The acceleration rate is equal to 20 MeV/m, the length of the accelerator's basic part is $L_{acc2} = 50$ m, and the high-frequency power consumption is $P = 15$ MW/m.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2015

ВВЕДЕНИЕ

Создание ускорителя протонов с энергией пучка ~ 1 ГэВ и средним током пучка $I_{av} \sim 1$ мА требует решения двух задач. Одна — это достижение требуемого высокого темпа ускорения с тем, чтобы иметь минимальную длину ускорителя. В настоящее время темп ускорения протонов $\Delta W_p/\Delta l \sim 1$ МэВ/м является явно недостаточным. Нужно стремиться к темпу ускорения ~ 30 МэВ/м, достигнутому в электронных ускорителях.

Отличие протонного ускорителя от электронного состоит в том, что у ускорителя протонов фазовое движение частиц не заморожено, поэтому надо выбирать синхронную фазу в диапазоне $20-70^\circ$. При этом необходимо, чтобы эта синхронная фаза не сильно изменялась за время пролета ступком резонатора. Это приведет к тому, что при ускорении протонов в последовательности сверхпроводящих резонаторов эти резонаторы должны быть достаточно узкими в направлении ускорения. Будем начинать ускорение с энергии протонов ~ 5 МэВ, $v_p = 3 \cdot 10^9$ см/с, β — скорость частиц, выраженная в единицах скорости света, $\beta_p = 0,1$, где $\beta = v/c$, $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с — скорость света в вакууме.

Длину резонатора вдоль оси ускорения можно оценить как $\beta\lambda/4$, где $\beta = 0,1$ — начальная скорость протонов; λ — длина волны ускорения, которую мы выберем $\lambda = 2$ м. В нашем случае $\beta\lambda/4 = 5$ см, что можно считать приемлемым. До активного использования сверхпроводимости в ускорительной технике ускорение протонов в последовательности резонаторов не представляло интереса, поскольку для создания значительной напряженности ускоряющего поля в такой ускорительной системе требовались большие затраты высокочастотной мощности. Такая ускоряющая система оказалась хуже других систем.

С появлением сверхпроводящих резонаторов потери высокочастотной мощности в резонаторах значительно уменьшились, и можно вернуться к рассмотрению пригодности этой системы для ускорения в ней протонов.

Другая проблема связана с требуемой интенсивностью ускоренного пучка. Если считать, что нужен средний ток ускоренного пучка порядка $I_{av} \approx 1$ мА, а временная структура работы ускорителя такова: длительность импульса $\tau_p = 200$ мкс, частота следования импульсов $F = 5$ Гц, то это означает, что импульсный ток пучка должен быть $I_{p\ pulse} \approx 1$ А.

Легко оценить число протонов в сгустке для этого случая. Величина импульсного тока протонов $I_{p \text{ pulse}} \approx 1$ А соответствует потоку $6 \cdot 10^{18} \text{ с}^{-1}$. Для периода волны $\tau_w = 6,7$ нс число протонов, содержащихся в одном сгустке, получается равным $6 \cdot 10^{18} \text{ с}^{-1} \cdot 6,7 \text{ нс} = 4 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$.

Проблемы удержания такого количества частиц в одном сгустке начнутся сразу же после выхода немодулированного пучка из ионного источника. Для модулированного пучка ситуация выглядит просто катастрофической. Рассмотрим этот случай на конкретном примере.

Примем радиус пучка $r_b = 0,4$ см. Если считать, что источник находится под потенциалом $U_{\text{source}} = 50$ кВ относительно Земли, то начальная (из источника) скорость частиц пучка $\beta_{\text{in}} = 10^{-2}$. Это означает, что длина немодулированного отрезка пучка равна длине замедленной волны: $l_{\text{bin}} = \lambda_s = \lambda \beta_{\text{in}} = 2$ см. Модулированный пучок занимает по фазам отрезок, примерно равный $\Delta\phi = 36^\circ$, т. е. протяженность сгустка после банчера $l_{\text{bin}} = 2$ мм. Объем сгустка, таким образом, составляет величину порядка $\pi r_b^2 l_{\text{bin}} \approx 0,1 \text{ см}^3$, объемная плотность частиц в сгустке $n_p = 4 \cdot 10^{11}$ протонов/см³.

Удержать от расталкивания по радиусу такой сгусток, по-видимому, можно соленоидальным магнитным полем. Удержание удобнее всего рассматривать на языке частот.

Если считать, что источник ионов находится вне магнитного поля соленоида, то, попав в магнитное поле, протоны будут вращаться в нем с ларморовской частотой $\omega_L = eH/2mc$, где $e = 5 \cdot 10^{-10}$ — элементарный заряд; $H \approx 10^5$ Гс — магнитное поле соленоида; $m = 1,7 \cdot 10^{-24}$ г — масса покоя протона. Эта частота должна быть много больше плазменной частоты $\omega_{\text{pl}} = (4\pi e^2 n_p / m)^{1/2} = 1,3 \cdot 10^3 \cdot n_p^{1/2} = 8 \cdot 10^8$ рад/с для выбранных параметров.

Подставляя цифры в выражение для ларморовской частоты, находим, что эта частота $\omega_L = 5 \cdot 10^8$ рад/с — это меньше плазменной частоты. Значит, магнитное поле $H \approx 10^5$ Гс с радиусом пучка $r_b = 0,4$ см сгусток удержать не сможет. Надо увеличивать напряжение, под которым находится источник относительно Земли. Если это напряжение увеличить в 16 раз до $U_{\text{source}} = 800$ кВ, то скорость частиц в пучке увеличится в 4 раза, сгусток вытянется в 4 раза и плотность частиц в нем упадет в 4 раза. Плазменная частота уменьшится в два раза до значения $\omega_{\text{pl}} \approx 4 \cdot 10^8$ рад/с. Такую плотность можно будет удержать по радиусу сверхпроводящим соленоидом.

На протоны будет действовать дефокусирующая сила со стороны волны. Соответствующая этой силе круговая частота $\Omega_r = \Omega_{\text{ph}}/1,41 = 7 \cdot 10^7$ рад/с. Она много меньше ларморовской частоты $\omega_L = 5 \cdot 10^8$ рад/с.

Рассмотрим теперь вопрос о том, можно ли удержать такую плотность протонного сгустка в продольном направлении. Будем следовать представлениям, изложенным в [1].

Введем параметр W_λ — удельное ускорение, равное отношению прироста энергии протоном на длине волны к энергии покоя протона.

Для бегущей волны

$$W_\lambda = eE\lambda \cos \phi_s / mc^2, \quad (1)$$

где E — напряженность ускоряющего электрического поля; ϕ_s — синхронная фаза. Выберем $\phi_s = 30^\circ$. Обычно это малый параметр в ускорителях протонов. Действительно, подставляя в (1) $E = 20$ кВ/см, $\lambda = 2$ м, $\cos \phi_s \approx 1$, $mc^2 = 1$ ГэВ, получаем $W_\lambda = 4 \cdot 10^{-3}$.

Этот параметр связан с частотой фазовых колебаний, с которой протоны в сгустке колеблются в продольном направлении:

$$\Omega_{\text{ph}} = \omega(W_\lambda \text{tg} \phi_s / 2\pi\beta_s)^{1/2}, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота ускорения. Подставляя цифры в формулу (2), получаем $\Omega_{\text{ph}} \approx 0,1\omega$, что означает: частота фазовых колебаний меньше частоты ускорения — $\Omega_{\text{ph}} \approx 10^8$ рад/с. Эта частота меньше плазменной $\omega_{\text{pl}} = 4 \cdot 10^8$ рад/с, значит, удержать сгусток в продольном направлении полем волны в заданных размерах не получится. Сгусток в продольном направлении будет расплываться.

Выход видится в том, чтобы ускорять сразу несколько пучков протонов (например, семь) в одной апертуре. Тогда, снизив ток пучка в одном луче до значения $I_p = 0,1$ А, можно будет получить импульсный ток пучка протонов $I_{p \text{ pulse}} \approx 0,7$ А.

1. ФОРМИРОВАНИЕ НЕСКОЛЬКИХ ПУЧКОВ ПРОТОНОВ В ОДНОМ ИОННОМ ИСТОЧНИКЕ

Будем считать, что ионный источник представляет собой семь дуоплаз-матронов, собранных в один пакет, расстояние между центрами пучков в которых составляет 6 см. Ток каждого луча должен быть $\sim 0,2$ А для того, чтобы после группировки с коэффициентом захвата $k_k = 1/2$ ток сгруппированного пучка составлял величину 0,1 А. При уменьшении импульсного тока на порядок плазменная частота уменьшится в 3 раза и станет порядка частоты фазовых колебаний в волне.

Что касается удержания в поперечном направлении, то пучок с током $I_p = 0,1$ А и с радиусом пучка $r_b = 0,4$ см можно будет удержать продольным магнитным полем с напряженностью $H = 10$ Тл. Ларморовская частота вращения протонов в магнитном поле при этом будет больше плазменной частоты колебаний протонов в сгустке. Важно отметить, что соленоидальное магнитное поле не имеет выделенного центра, и каждый из семи пучков будет просто удерживаться в поперечном направлении относительно начальной скорости пучка.

2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ УСКОРЕНИЕ ПУЧКОВ ПРОТОНОВ В СПИРАЛЬНЫХ ВОЛНОВОДАХ

Спиральный волновод является теоретически хорошо изученной [2, 3] структурой, имеющей высокий темп ускорения $\Delta W/\Delta l \sim 3 \text{ МэВ/м}$. Отличительной особенностью спирального волновода являются исключительно малые размеры в поперечном направлении.

Выберем начальный радиус спиралей (рис. 1, *a*), в которых должны ускоряться пучки протонов, равным $r_{0in} = 1 \text{ см}$ и радиус внешнего экрана $R_{sc} = 3 \text{ см}$. Тогда вся сборка (рис. 1, *б*), состоящая из семи экранированных спиральных волноводов, будет иметь наружный диаметр $D_{ass} = 18 \text{ см}$.

Можно, выбором синхронной фазы, за счет снижения темпа ускорения увеличить частоту фазовых колебаний и тем самым увеличить величину ускоряемого тока [4]. Действительно, если выбрать синхронную фазу $\phi_s = 60^\circ$, то темп ускорения (формула (1)) упадет в 1,7 раза, частота фазовых колебаний возрастет в отношении $(\text{tg } 60^\circ/\text{tg } 30^\circ)^{1/2}$, т. е. в 1,7 раза, что приведет к увеличению на 70 % частоты фазовых колебаний.

Чтобы не проводить расчеты заново, будем сравнивать условия ускорения в одном из семи модулей с параметрами спирального волновода, рассмотренными в работе [3].

В [3] проанализирован процесс ускорения ионов золота, имеющих отношение заряда ионов $Z = 69$ к массе $A = 197$, равное $Z/A = 0,3$. У протонов же, имеющих отношение заряда к массе $Z/A = 1$, при выбранных параметрах темп ускорения будет в 3 раза больше. В [3] начальная энергия ускорения выбрана намного меньшей, чем $W_{in} = 0,8 \text{ МэВ}$ в данной работе. Эта энергия в ускорителе ионов золота достигается на длине ускорения 1 м. Параметры ускорителя ионов золота будут такими же, как для ускорителя протонов.

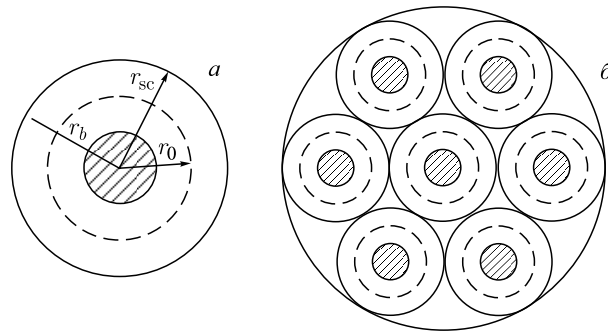


Рис. 1. Схема расположения пучка в спиральном волноводе (*a*) и многопучковая сборка (*б*)

Начальный радиус спирали в [3] выбран равным 2 см. В данной работе начальный радиус спирали $r_{in} = 1$ см, т. е. в 2 раза меньше.

Здесь использован для спирали термин «начальный», поскольку предполагается, что радиус намотки спирали будет изменяться по длине ускорителя, уменьшаться от начала к концу ускорения в секции.

Такое уменьшение радиуса намотки спирали обусловлено тем, что при намотке спирали на цилиндрический каркас по мере увеличения фазовой скорости волны в спирали уменьшается напряженность поля на оси спирали. Фазовую скорость волны спирали надо непрерывно увеличивать по мере ускорения ионов, чтобы выполнялся синхронизм: фазовая скорость волны должна быть все время равна скорости ускоряемых ионов.

Фазовая скорость волны в спирали приближенно определяется формулой

$$\beta_{ph} \approx \operatorname{tg}\psi \approx h/2\pi r_0, \quad (3)$$

где $\beta_{ph} = v_{ph}/c$ — фазовая скорость волны, выраженная в единицах скорости света; $\operatorname{tg}\psi$ — тангенс угла намотки спирали; h — шаг намотки спирали; r_0 — радиус намотки спирали. Из формулы (3) видно, что если уменьшить радиус намотки спирали в 2 раза, по сравнению со спиралью, рассмотренной в работе [3], и одновременно в 4 раза увеличить фазовую скорость волны, то шаг намотки увеличится в 2 раза по сравнению с [3].

Шаг намотки спирали можно значительно увеличить, если использовать диэлектрическое заполнение между спиралью и экраном, как это было предложено в работе [5]. Надо, однако, иметь в виду, что при этом большая часть потока высокочастотной мощности будет распространяться по диэлектрику, т. е. между спиралью и экраном. Мощность, требуемая для создания на оси заданной напряженности электрического поля, значительно возрастет.

Высокочастотная мощность P связана с напряженностью поля на оси спирали E_0 соотношением [5]

$$P = (c/8)E_0^2 r_0^2 [kk_3/k_1^2] \{ (1 + I_0 K_1 / I_1 K_0) (I_1^2 - I_0 I_2) + \varepsilon (I_0 / K_0)^2 (1 + I_1 K_0 / I_0 K_1) (K_0 K_2 - K_1^2) \}, \quad (4)$$

где $k = \omega/c$ — волновой вектор; $k_1 = k(1/\beta_{ph}^2 - 1)^{1/2}$ — радиальный волновой вектор внутри спирали; $k_3 = \omega/v_{ph}$ — волновой вектор в аксиальном направлении; I_0, I_1, I_2 — модифицированные функции Бесселя первого рода; K_0, K_1, K_2 — модифицированные функции Бесселя второго рода. Первое слагаемое в фигурных скобках соответствует потоку мощности, распространяющемуся внутри спирали, второе слагаемое соответствует потоку мощности, распространяющемуся между спиралью и экраном. Если эта область заполнена диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ε , то перед вторым слагаемым должен стоять множитель ε .

В случае больших замедлений, $\beta_{ph} \ll 1$, и оптимального соотношения между периметром витка спирали $2\pi r_0$ и замедленной длиной волны $\lambda_s = \beta_{ph}\lambda$, $\lambda = 2$ м — длина волны в вакууме, где под оптимальным соотношением мы понимаем отношение $x = 2\pi r_0/\beta_{ph}\lambda \approx 1$, формула (4) упрощается. Выражение $[kk_3/k_1^2]$ можно заменить на β_{ph} , значение выражения в фигурной скобке равно 4,44 для аргумента функций Бесселя $x = 1$.

Из соотношения $x = 2\pi r_0/\beta_{ph}\lambda \approx 1$ видно, что частота $f = 150$ МГц не является оптимальной для радиуса спирали $r_{0in} = 1$ см. Дело в том, что при ускорении частиц в спиральном волноводе параметр x все время уменьшается. С одной стороны, уменьшается радиус намотки спирали, что необходимо для поддержания равномерного темпа ускорения вдоль секции [5], с другой стороны, при ускорении вдоль секции увеличивается фазовая скорость волны.

Таблица 1. Значения первого и второго слагаемых, стоящих в фигурной скобке формулы (4)

x	I	II
0,1	0,1	66,8
0,2	0,14	22
0,3	0,18	12,14
0,4	0,226	8,286
0,5	0,273	6,365
0,6	0,326	5,277
0,7	0,386	4,618
0,8	0,454	4,208
0,9	0,532	3,958
1	0,620	3,819
1,1	0,721	3,763
1,2	0,836	3,774
1,3	0,968	3,844
1,4	1,119	3,96
1,5	1,29	4,142
1,6	1,494	4,369
1,7	1,724	4,650
1,8	1,989	4,989
1,9	2,295	5,393
2	2,69	5,867
2,5	5,441	9,68
3	11,336	17,601

и второго слагаемых, стоящих в фигурных скобках в формуле (4). Видно, что с увеличением параметра x оба слагаемых сначала монотонно падают. Сумма двух слагаемых достигает минимума при параметре $x = 1$, что означает равенство периметра витка спирали и замедленной длины волны. Минимальное значение величины в фигурной скобке в формуле (4) свидетельствует о том, что при заданном уровне вводимой в спираль высокочастотной мощности будет получаться максимальная напряженность поля на оси спирали.

При дальнейшем росте параметра x численное значение выражения в фигурной скобке начинает монотонно возрастать. Если выбрать в начале ускорения параметр x несколько больше единицы, то максимум напряженности ускоряющего поля будет достигнут в середине секции [5], после чего напряженность поля начнет уменьшаться.

Для параметра $x = 1,5$ и начального радиуса спирали $r_{0in} = 1$ см, начальной скорости волны в спирали $\beta_{ph in} = 4 \cdot 10^{-2}$ оптимальной является длина волны $\lambda = 100$ см, при этом частота ускорения $f = 300$ МГц. Заметим, что пропорционально частоте ускорения, согласно формуле (2), растет частота фазовых колебаний, которая теперь уже превосходит плазменную частоту. Очевидно, что от частоты разбиения непрерывного пучка на сгустки плазменная частота сгустков не зависит.

По сравнению с работой [3] радиус спирали уменьшен в 2 раза, а начальная фазовая скорость увеличена в 4 раза. Теперь для достижения такой же напряженности поля $E = 20$ кВ/см потребуется такая же высокочастотная мощность — 3 МВт. Поскольку модулей в сборке семь, общая потребляемая высокочастотная мощность будет равна 21 МВт.

Высокочастотная мощность 21 МВт пойдет на создание требуемой напряженности поля. Нужно еще учесть нагрузку секции протонным пучком. Оценим ее из следующих соображений. Пусть ускорение пучка происходит в непрерывном режиме. Это означает, что в пучок передается мощность $6 \text{ МВ} \cdot 0,7 \text{ А} \approx 4 \text{ МВт}$. Такая же мощность будет передаваться в пучок и при длинных ($\tau_p = 200$ мкс) импульсах ускорения, так что потребная высокочастотная мощность должна быть равна $P \approx 25 \text{ МВт}$.

Длину ускорения протонов до 6 МэВ можно оценить следующим образом. При амплитуде ускоряющего напряжения $E = 2$ МВ/м и косинусе синхронной фазы $\cos \phi_s = 1/2$ темп набора энергии будет равен 1 МэВ/м. Соответственно, энергию в 6 МэВ протоны наберут на длине $L_{\text{acc1}} = 6$ м.

Подводя итог вышесказанному, приведем таблицу параметров начальной части ускорителя.

Таблица 2. Параметры начальной части ускорителя

Параметр	Значение
Напряжение, под которым находится протонный источник, кВ	800
Импульсный ток источника, А	$7 \cdot 0,2$
Ток сгруппированного пучка, мА	$7 \cdot 100$
Частота ускорения f , МГц	300
Напряженность фокусирующего магнитного поля H , Тл	10
Длительность импульса тока τ_b , мкс	200
Средняя напряженность электрического поля E_0 , МВ/м	2
Косинус синхронной фазы $\cos \phi_s$	0,5
Частота повторения импульсов F , Гц	5
Высокочастотная мощность P , МВт	25
Длина ускорителя L_{acc1} , м	6

3. СВЕДЕНИЕ ПЕРИФЕРИЧЕСКИХ ПУЧКОВ В ОБЩИЙ ПУЧОК ПРОТОНОВ

Независимое ускорение каждого из семи пучков на начальной стадии ускорения требуется для того, чтобы обеспечить условия удержания ускоряемых сгустков в продольном и в поперечном направлениях. После достижения сгустками скорости порядка 0,1 с можно все семь пучков свести в один.

Приведем последовательность операций, необходимую для формирования протонного пучка нитевидной формы. Выведенный из спиральных волново-

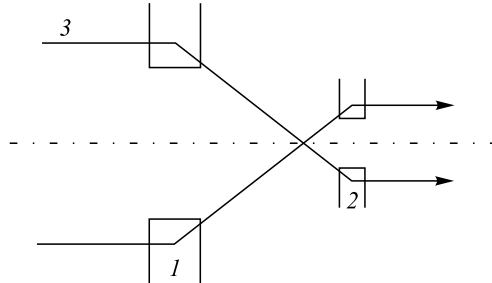


Рис. 2. Схема перевода протонных пучков в область вблизи оси ускорителя: 1 — первая линза; 2 — вторая линза; 3 — траектория пучков

дов пучок протонов можно перевести на радиус, близкий к оси, осуществив два поворота пучка на один и тот же угол. Сначала линзой 1 (рис. 2) с азимутальным магнитным полем повернем пучок к оси, а когда протоны приблизятся к оси, их траекторию нужно повернуть линзой 2 на точно такой же угол, но в противоположном направлении.

Проведем расчеты траектории протонного пучка.

Пусть протоны соберутся на ось через 3 м после прохождения линзы 1. Это значит, что радиальный угол, который они приобретут при прохождении этой линзы, $\Theta = 6 \text{ см}/300 \text{ см} = 2 \cdot 10^{-2}$ рад. Пусть поле в линзах $H_\phi = 10^4$ Гс, длина дорожки (вдоль оси z) $l_1 = 7$ см, тогда для протонов с энергией покоя $mc^2 = 1$ ГэВ

$$\Theta = eH_\phi l_1 / mc^2 = 10^4 \cdot 3 \cdot 10^2 \cdot 7 / 10^9 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ рад}, \quad (5)$$

что соответствует требуемому углу. На расстоянии 30 см от точки, где протоны будут пересекать ось, поставим вторую линзу и сообщим протонам угол в другую сторону. После этого пучок будет двигаться параллельно оси z , но на радиусе в отношении $300 \text{ см}/30 \text{ см}$ — в 10 раз меньшем, чем начальное значение. Радиус пучка ионов будет $r_b \approx 1,5$ см. Точно такой же принцип сжатия широких пучков используется в оптике, где это делается с помощью двух линз, имеющих различные фокусные расстояния.

4. УСКОРЕНИЕ ПРОТОНОВ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ РЕЗОНАТОРОВ

После того как периферические пучки сведены к оси в один общий пучок, его нужно демодулировать с частоты $f = 300$ МГц и промодулировать на частоте $f_1 = 1,3$ ГГц, соответствующей частоте Международного линейного коллайдера [6].

Длина волны $\lambda_1 \approx 24$ см соответствует частоте $f_1 = 1,3$ ГГц. Это означает, что при возбуждении в нем волны E_{010} диаметр резонатора будет порядка $d_{cav} = 3/4\lambda_1 = 18$ см. Высота цилиндрического резонатора, т. е. протяженность его вдоль оси ускорения, должна быть порядка $l_{in} = \beta_{in1}\lambda_1/4 \approx 1$ см. Высота резонатора должна увеличиваться с ростом скорости частиц — от $\beta_{in1} = 0,1$ в начале ускорения до $\beta_{in1} = 0,9$ в конце ускорения.

Можно рассчитать добротность и мощность, требуемые для достижения заданной напряженности поля, в теплом резонаторе с такими же размерами.

Формула, связывающая высокочастотную мощность P с напряжением между торцевыми стенками резонатора U , выглядит следующим образом:

$$P = U^2/2R_{sr}, \quad (6)$$

где R_{sr} — шунтовое сопротивление резонатора. Шунтовое сопротивление резонатора, в свою очередь, может быть выражено через характеристическое сопротивление ρ_s и добротность резонатора Q . Шунтовое сопротивление $R_{sr} = \rho_s Q$.

Добротность резонатора Q можно оценить как отношение объема резонатора V к объему, равному площади внутренней поверхности, умноженной на глубину скин-слоя δ . Глубина скин-слоя для меди на частоте 1,3 ГГц $\delta = c/(2\pi\sigma\omega)^{1/2}$, где $\sigma = 5,4 \cdot 10^{17} \text{ c}^{-1}$ — проводимость меди, $\omega = 2\pi f_1$ — круговая частота ускорения. Подставляя цифры в выражение для добротности для приведенных выше параметров цилиндрического резонатора, находим: $\delta = 1,8$ мк; площадь внутренней поверхности цилиндрического резонатора с радиусом $d_{cav}/2 = 9$ см и высотой $l_{in} = 1$ см $S_{in} = \pi d_{cav}(d_{cav}/2 + l_{in}) = 565 \text{ см}^2$; объем резонатора $V = (\pi d_{cav}^2/4)l_{in} = 254 \text{ см}^3$. Таким образом, его добротность $Q = V/S_{in}\delta = 2,5 \cdot 10^3$.

Характеристическое сопротивление цилиндрического резонатора для моды E_{010} [7]

$$\rho_s = (\mu/\varepsilon)^{1/2}l_{in}/d_{cav}, \quad (7)$$

где $(\mu/\varepsilon)^{1/2}$ — волновое сопротивление вакуума, $(\mu/\varepsilon)^{1/2} = 370$ Ом в практической системе единиц. Подставляя цифры в формулу (7), находим, что характеристическое сопротивление резонатора $\rho_s = 20$ Ом. Шунтовое сопротивление такого резонатора $R_{sr} = \rho_s Q = 50$ кОм.

Если требуется получить темп набора энергии в последовательности таких теплых резонаторов, равный $\Delta W/\Delta l = 20$ МэВ/м, то напряжение между торцевыми стенками резонатора при расстоянии между ними $l_{in} = 1$ см должно быть $U = 200$ кВ. Согласно формуле (6), в резонатор для этого пришлось бы ввести мощность $P = 4 \cdot 10^5$ Вт. На один метр ускорителя потребуется затратить мощность 40 МВт/м (без учета передачи мощности в пучок). Такая мощность является слишком большой, и поэтому ускорители,

Таблица 3. Параметры основной части ускорителя

Параметр	Значение
Частота ускорения f , ГГц	1,3
Средняя напряженность электрического поля E_0 , МВ/м	20
Высокочастотная мощность, приходящаяся на единицу длины, МВт/м	15
Добротность резонаторов Q	$2,5 \cdot 10^6$
Напряженность фокусирующего магнитного поля H , Тл	10
Конечная энергия протонов, ГэВ	1
Длина ускорителя L_{acc2} , м	50

состоящие из последовательности отдельных коротких цилиндрических теплых резонаторов, на практике не используются.

Иная ситуация складывается для сверхпроводящих резонаторов, где добротность отдельного резонатора на 7 порядков выше [6]. Использование сверхпроводящих резонаторов позволит на столько же порядков снизить мощность, требуемую для возбуждения резонатора. При увеличении за счет сверхпроводимости добротности на три порядка мощность, требуемая для возбуждения резонаторов, будет составлять ~ 40 кВт/м. Мощность, передаваемая в пучок, намного больше: $20 \text{ МВ/м} \cdot 0,7 \text{ А} = 14 \text{ МВт/м}$, так что общая потребная высокочастотная мощность будет порядка 15 МВт/м , что можно считать приемлемой платой за достижение высокого (20 МэВ/м) темпа ускорения протонов.

Параметры ускорителя, состоящего из последовательности сверхпроводящих резонаторов, приведены в табл. 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ускоритель с рассмотренными в данной статье параметрами может работать совместно с размножающей нейтроны мишенью. Размножающая мишень — это подкритический ядерный реактор, имеющий коэффициент размножения порядка 20. Тогда такой ускоритель с подкритическим реактором по интенсивности нейтронного потока будет превосходить источник ESS (European Spallation Source) [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Капчинский И.М.* Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях. М.: Атомиздат, 1966.
2. *Доля С.Н., Решетникова К.А.* Линейный ускоритель ионов C^{+6} — инжектор синхротрона, предназначенного для адронной терапии. Препринт ОИЯИ Р9-2011-82. Дубна, 2011;

- [http://www1.jinr.ru/Preprints/2011/082\(P9-2011-82\).pdf](http://www1.jinr.ru/Preprints/2011/082(P9-2011-82).pdf);
<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1307/1307.6302.pdf>.
3. *Dolya S. N., Reshetnikova K. A.* Acceleration of Gold Ions in the Spiral Waveguide.
http://www.researchgate.net/profile/S_Dolya/contributions.
 4. *Капчинский И. М.* Сильноточные линейные ускорители ионов // УФН. 1980. Т. 132, вып. 4. С. 639.
http://ufn.ru/ufn80/ufn80_12/Russian/r8012b.pdf.
 5. *Доля С. Н., Решетникова К. А.* Об электродинамическом ускорении макроскопических частиц. Препринт ОИЯИ Р9-2009-110. Дубна, 2009;
[http://www1.jinr.ru/Preprints/2009/110\(P9-2009-110\).pdf](http://www1.jinr.ru/Preprints/2009/110(P9-2009-110).pdf);
<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0908/0908.0795.pdf>.
 6. <http://www.linearcollider.org/>
 7. *Карлинер М. М.* Электродинамика СВЧ: Курс лекций. Новосибирск, 1999. С. 228.
 8. <https://europeanspallationsource.se/>

Получено 16 октября 2015 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 08.12.2015.

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

Усл. печ. л. 0,87. Уч.-изд. л. 1,09. Тираж 215 экз. Заказ № 58691.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/