

ФОРМИРОВАНИЕ ПУЧКОВ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В НАЧАЛЬНОЙ ЧАСТИ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ ПРЕДОБДИРОЧНОЙ СЕКЦИИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЛУМЗИ

В.А. Бомко, Б.В. Зайцев, А.Ф. Кобец, К.В. Павлий, В.В. Панов

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,

Харьков, Украина

E-mail: zajtsev@kipt.kharkov.ua

Приведены результаты исследования по разработке новой предобдирочной секции линейного ускорителя многорядных ионов с увеличенным отношением их массы к заряду $A/q = 20$, что позволит значительно расширить диапазон ускоряемых ионов и увеличить интенсивность пучков. В основу ПОС-20 положена структура с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой ПОКФ (RFQ). Разработана программа и выполнены оптимизационные расчеты параметров структуры ПОКФ, обеспечивающие эффективное ускорение ионов с $A/q = 20$ от 6 до 150 кэВ/нукл. при захвате в процесс ускорения около 90 % от инжектируемого пучка.

ВВЕДЕНИЕ

В новой предобдирочной секции ПОС-20 предполагается использовать на участке ускорения тяжелых ионов в диапазоне от 6 до 150 кэВ/нукл. ускоряющую структуру с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой ПОКФ (RFQ) [1,2], предложенной И.М. Капчинским и В.А. Тепляковым и в значительной степени усовершенствованной с учетом особенностей создаваемых линейными ускорителями во многих лабораториях мира [3,4]. Разработка ускоряющей структуры для новой ПОС-20 для линейного ускорителя многорядных ионов (ЛУМЗИ) ведется на протяжении последних лет. Выполнены оптимизационные исследования по выбору варианта ускоряющей структуры, который позволил бы эффективно ускорять тяжелые ионы с таким высоким отношением $A/q = 20$, обеспечивая при этом минимально возможную длину электродов структуры и максимальную трансмиссию пучка. Вариант ускоряющей структуры ПОКФ для ПОС-20 докладывался на прошлой конференции и опубликован в работе [5].

В данной работе описан вариант ускоряющей структуры для ПОС-20, в котором формирование пучка тяжелых ионов в начальной части ПОКФ осуществляется с отходом от классического варианта, где имеет место адиабатический процесс группировки, оставляющий постоянными продольные геометрические размеры сгустков пучка, что обеспечивает условия для ускорения без потерь высокоэнергетичные пучки тяжелых ионов. Отход от классической адиабатики с целью повышения темпа ускорения в основной части ПОКФ связан с повышением глубины модуляции электродов, рост которой приводит к увеличению фазовой длины сгустков. Однако, если стартовать с хорошо сгруппированным пучком, тогда в основной части структуры ПОКФ этот рост будет слабым. Поэтому надо стартовать с сепаратрисой, в которой полностью помещается фазовый портрет пучка. Для этого служат участки формирования фазового пространства – shaper и prebuncher.

Основная задача начальных участков заключается в достижении таких характеристик пучка на вхо-

де в основную часть структуры ПОКФ, после prebunchera, которые обеспечат высокий темп ускорения. Такими параметрами, как видно из соотношения

$$\Delta W_n = \frac{qVT \cos \varphi_s}{A}, \quad (1)$$

являются разность потенциалов между электродами V , синхронная фаза φ_s , эффективность ускорения T , которая растет при росте фактора дефокусировки Δ , а также находится в зависимости от роста коэффициента модуляции, m .

$$\Delta = \frac{VT \pi \sin \varphi_s}{10mc^2 \beta^2}, \quad T = \frac{(\pi/4)(m^2 - 1)}{m^2 I_0(ka) + I_0(mka)}. \quad (2)$$

Роль темпа ускорения за счет роста φ_s и Δ , в отличие от роста m , не приводят к росту фазового портрета сгустков пучка.

1. УЧАСТОК ПРОДОЛЬНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА ИОНОВ SHAPER

Разрабатывается начальный участок в ПОКФ, в котором продольный фазовый портрет пучка гладким образом переформирует координаты инжектируемых частиц и начинает создавать продольный эмиттанс. Эффект достигается за счет ненулевого продольного электрического поля, образуемого синусоидальной модуляцией, которая приводит к форме продольных характеристик пучка на фазовом портрете в виде S. Для гарантии эффективного захвата необходимо процесс вращения осуществлять непрерывно на длине $1/4$ продольного колебания. Следовательно, для удержания продольного эмиттанса малым, необходимо удерживать малой высоту сепаратрисы, которая находится в обратной зависимости от глубины модуляции электродов m . Расчеты показывают, что для получения требуемой высоты сепаратрисы необходима очень малая величина m на протяжении большого количества ячеек.

Выход из этого положения может быть найден, как предполагается в работе [6], в результате использования комбинации участков конечной величины m и нулевого продольного поля на ячейках,

где отсутствует модуляция электродов. При этом динамика пучка не сильно будет отличаться от случая с линейным ростом $m = 1,001 \dots 1,009$, который технологически неосуществим.

Участок предварительного формирования пучка shaper предназначен для максимально возможной группировки инжектируемого пучка ионов с $A/q = 20$. При этом основным требованием является удержание малым продольного эмиттанта.

Составлена программа расчета структуры shaper, названная RFQSH, и выполнены оптимизационные расчеты ее параметров.

Исходные характеристики пучка следующие:
 входная энергия ионов $W_0 = 6$ кэВ/нукл.;
 рабочая длина волны $\lambda = 6,36$ м ($f = 47,2$ МГц);
 длина входной ячейки структуры $L_0 = 1,13$ см;
 средний радиус апертуры $R_0 = 0,75$ см;
 синхронная фаза $\varphi_s = -90^\circ$.

Для определения параметров ускоряющей структуры, обеспечивающих движение пучка ионов на протяжении 1/4 продольного фазового колебания, выполняется расчет участка, который проходит частица с исходной фазой $\varphi_p = 0^\circ$, приближаясь к синхронной фазе $\varphi_s = 0^\circ$. При этом определяются такие параметры, как текущая фаза расчетной частицы на участках с модулированными и гладкими электродами, разность фаз, энергий и длины пути расчетной частицы по отношению к синхронной частице и, в конечном счете, величины этих параметров на входе из указанных участков.

Задача удержания малого продольного эмиттанта при значительной группировке пучка на участке shaper должна выполняться путем удержания высоты фазового портрета сгустков на должном уровне, т.е. сохранения величины разброса по энергии пучка. В этой связи, учитывая, что основную роль в росте продольного эмиттанта играет коэффициент модуляции электродов, m , то ставится задача оптимального выбора этой величины таким образом, чтобы учесть не только требования группировки, но и технологические возможности. Нетрудно видеть, что вариант с $m = 1,01$ при величине среднего радиуса канала $R_0 = 0,75$ см означает технологический размер модулированных электродов 74 мкм, что граничит с предельной точностью изготовления.

В связи с этим, нами были рассмотрены два варианта структуры shaper, в которых используются величины $m = 1,01$ и $m = 1,02$. При этом основным требованием, наряду с условием максимальной группировки, являлась величина допустимого разброса по энергии, определяющая высоту фазового портрета сгустка.

В Табл.1 приведены параметры пучка, формируемого в структуре shaper при $m = 1,01$ и $m = 1,02$, обеспечивающие одинаковую величину $\Delta W/W$ при движении частицы с исходной фазой $\varphi = 0^\circ$ до $\varphi = -90^\circ$, т.е., совершающей 1/4 фазового колебания.

Таблица 1
 Параметры пучка в двух вариантах структуры shaper

Наименование параметра	$m = 1,01$	$m = 1,02$
Количество модулированных ячеек	8	4
Количество немодулированных ячеек	47	49
Набег фазы на модулированных ячейках	$-7,78^\circ$	$-4,3^\circ$
Набег фазы на немодулированных ячейках	$-81,34^\circ$	$-84,4^\circ$
Фазовая протяженность сгустка	$267,23^\circ$	$268,53^\circ$
Максимальный разброс по энергии, $\Delta W/W$	2,17%	2,18%
Длина shaper, см	62,66	60,38

Из таблицы видно, что вариант с $m = 1,02$ по основным параметрам пучка не уступает варианту с $m = 1,01$. Изменилась несколько общая длина структуры и количество ячеек на обоих участках, в то время как разброс по энергии в обоих случаях почти одинаков. Следовательно, фазовый портрет остается неизменным.

Таким образом, в структуре ПОС-20 на участке shaper в основу динамики положен вариант с $m = 1,02$. При этом протяженность сгустка составляет $\Phi = 268,53^\circ$, а это значит, что на входе в следующий участок структуры – prebuncher – синхронная фаза будет иметь величину $\varphi_s = -79,78^\circ$. Параметры shapera, наряду с параметрами для всех участков ПОКФ для ПОС-20, приведены в Табл.2.

Таблица 2

Основные параметры всех участков ПОКФ для ПОС-20

	Наименование параметра	shaper	prebuncher	buncher	accelerator
1	Энергия ионов на выходе W , МэВ/нукл.	6	6,514	49,07	150,18
2	Длина ячейки L , см	1,138	1,18412	3,185	5,652
3	Синхронная фаза, град	-79,78	-52,53	-20	-20
4	Протяженность сгустка F , град	268,53	162,99	60,19	60,19
5	Коэффициент модуляции m	1,02...1,00	1,078	2,04	2,04
6	Радиус апертуры a , см	0,7426...0,75	0,722	0,493	0,493
7	Фактор пролетного времени T	0,006493...0	0,02529	0,43794	0,46703
8	Длина участка Z , см	60,38	31,0182	163,2023	213,7279

2. УЧАСТОК ПРОДОЛЬНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА PREBUNCHER

Ставится задача оптимизации процесса ускорения пучка тяжелых ионов, что позволит существенно уменьшить общую длину структуры с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой по сравнению с классическим вариантом адиабатической группировки ускоряемого пучка. При этом должны быть обеспечены его высокие радиально-фазовые характеристики и высокая трансмиссия в процессе ускорения. Согласно условиям формирования тяжелых ионов, разработанных S. Yamada [7] для варианта ускорения пучков сравнительно низкой интенсивности, что имеет место для тяжелых ионов, участок группировки *gentlebuncher* делится на два – *prebuncher* и *buncher*, в каждом из которых выбираются различные законы изменения $\varphi_s(z)$ и $\Delta(z)$. Профиль $\varphi_s(z)$ выбирается тщательно. Вначале фаза может меняться быстро, потому что фазовое пространство на краях фазового портрета слабо заселено в процессе группировки на участке *shaper*. Позже, когда фазовый портрет сожмется (коллапсирует) до сплошного массива частиц, φ_s может двигаться слабее, так чтобы условия адиабатики выполняли удержание сгустка на участке *buncher*. φ_s в *prebuncher* меняется очень быстро, например от -79° , что имеет место на выходе *shaper*, до -55° . Итак, *prebuncher* – это быстрая фазовая компрессия на протяжении полупериода продольных фазовых колебаний.

В основу метода формирования продольных характеристик пучка, разработанного Yamada, положено условие постоянства продольного акцептанса – площадь сепаратрисы S , которая выражается через соотношение

$$S = \sqrt{|\Delta|} \beta^2 g(\varphi_s), \quad (3)$$

где Δ – параметр дефокусировки

$$g(\varphi_s) = \frac{\Phi}{2\pi} \sqrt{1 - \varphi_s \cot \varphi_s}, \quad (4)$$

Φ – угловая длина сепаратрисы.

Увеличение S важно для формирования сгустка при наличии объемного заряда. Для пучка малой интенсивности, величина S остается постоянной, что способствует более быстрой группировке с достаточно высокой трансмиссией. В случае *prebuncher* Δ увеличивается с ростом β согласно соотношению

$$\Delta = \Delta_b - (\Delta_b - \Delta_i) \left[\frac{\beta - \beta_2}{\beta_1 - \beta_2} \right]^n \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (5)$$

где Δ_i и Δ_b – начальное и конечное значения Δ этого участка, β_1 и β_2 – соответствующие скорости синхронных частиц.

Расчет участка *prebuncher*-а для ПОС-20 выполнялся с учетом приведенных соотношений, исходя из заданных начальных и конечных характеристик пучка тяжелых ионов и разработанной последовательности операций, используя известные зависимости. Согласно этой процедуре разработана программа расчета участка *prebuncher*-а, названная RFQ RB. Исходные характеристики пучка следующие:

$$\varphi_s = -79,78^\circ; \quad \Phi_0 = 268,53^\circ; \quad \beta_0 = 3,579 \cdot 10^{-3}.$$

Определялись последовательно для каждой ячейки следующие параметры:

$$T_n, \Delta W_n, W_n, \beta_n, \Delta_n, g_n(\varphi), \Phi_n, m_n, a_n, z_n.$$

На Рис.1 приведен фазовый портрет пучка на выходе из *prebuncher*, а основные параметры – в соответствующей колонке Табл.2.

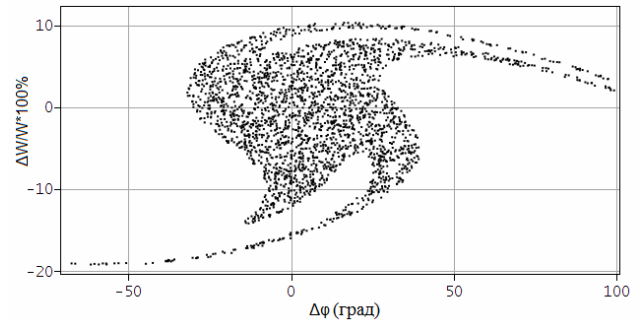


Рис.1. Фазовый портрет пучка на выходе из участка *prebuncher*

3. УЧАСТКИ УСКОРЕНИЯ СФОРМИРОВАННОГО ПУЧКА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Пучок тяжелых ионов на протяжении участков *shaper* и *prebuncher* сформирован в сгустки частиц, которые по своим радиальным и фазовым характеристикам позволяют нарастить темп ускорения, сохраняя при этом на должном уровне радиальный и продольный эмиттансы. На основной части ПОКФ ПОС-20 располагаются 2 участка: адиабатический *buncher* и участок ускорения (*accelerator*).

1. Адиабатический группирователь (*buncher*) заканчивает процесс группировки и начинает более эффективное ускорение при слабом увеличении площади фазового портрета (ΔW , $\Delta\varphi$). Если в *prebuncher* φ_s может увеличиваться быстро, потому что фазовое пространство на концах фазового портрета слабо заселено, то в *buncher*, на котором фазовый портрет коллапсирует до сплошного остова, состоящего из сплошного ядра частиц, φ_s должна двигаться (расти) более слабо, соблюдая адиабатические условия удержания сгустков пучка в процессе ускорения.

При расчете геометрических параметров *buncher* и характеристик пучка в процессе его ускорения использовались аналитические соотношения по методике Капчинского [1,2] в варианте адиабатической группировки. Определялись текущие и конечные величины параметров: T , ΔW , W , β , L , φ , Φ , m , a , z . Результаты расчетов приведены в соответствующей колонке Табл.2. На участке *buncher* ионы ускоряются от 6,5 до 49 кэВ/нукл. на длине 163,2 см. Синхронная фаза на выходе *buncher* составляет $\varphi_s = -20^\circ$, при этом протяженность сгустка сократилась до 60° . Величина коэффициента модуляции и величина апертуры достигают конечных значений $m = 2$, $a = 0,5$ см.

2. Участок ускорения (*accelerator*). Ускорение на этом участке осуществляется по указанной методике при постоянных величинах φ_s , Φ , m , a . Темп ускорения достаточно высокий, определяется величиной фактора времени пролета T , изменение которого зависит от меняющейся величины β . Величина T

меняется на участке accelerator от 0,44 до 0,47, что, в конечном счете, позволяет достичь темпа ускорения 0,47 кэВ/нукл./м или для ионов с $A/q = 20$ 0,94 МэВ/м.

Основные величины параметров секции ПОКФ для ПОС-20 приведены в Табл.2. Как видно, тяжелые ионы с $A/q = 20$ ускоряются от 6 до 150 кэВ/нукл. на длине 468 см. На Рис.2 приведен фазовый портрет пучка ионов на выходе из структуры ПОКФ. Как видно, инжектируемые частицы с энергией 6 кэВ/нукл. в процессе ускорения до энергии 150 кэВ/нукл. сформированы в компактный сгусток с трансмиссией 90 %, фазовой протяженностью $\Phi = 14^\circ$ и энергетическим разбросом $\Delta W/W = \pm 2\%$. Расчеты выполнялись без учета пространственного заряда пучка. На Рис.3 приведены изменения фазового профиля (а) и разброса по энергиям (б) вдоль структуры ПОКФ. На Рис.4 приведены радиальные характеристики пучка, определяющие эмиттансы

пучка в плоскостях x и y . Величина приведенного эмиттанса для 90 % тока пучка находится в пределах $\varepsilon_{x,y} = 0,04$ п.мм мрад. На Рис.5 показан процесс изменения параметров структуры вдоль всей секции ПОКФ.

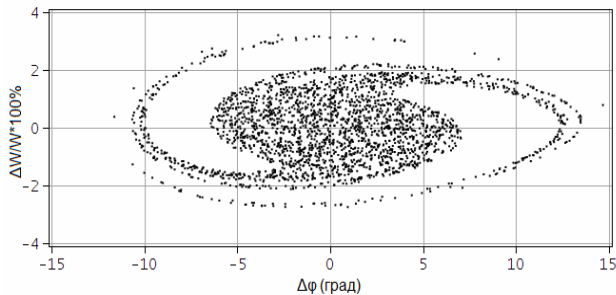


Рис.2. Фазовый портрет пучка ионов на выходе из структуры ПОКФ

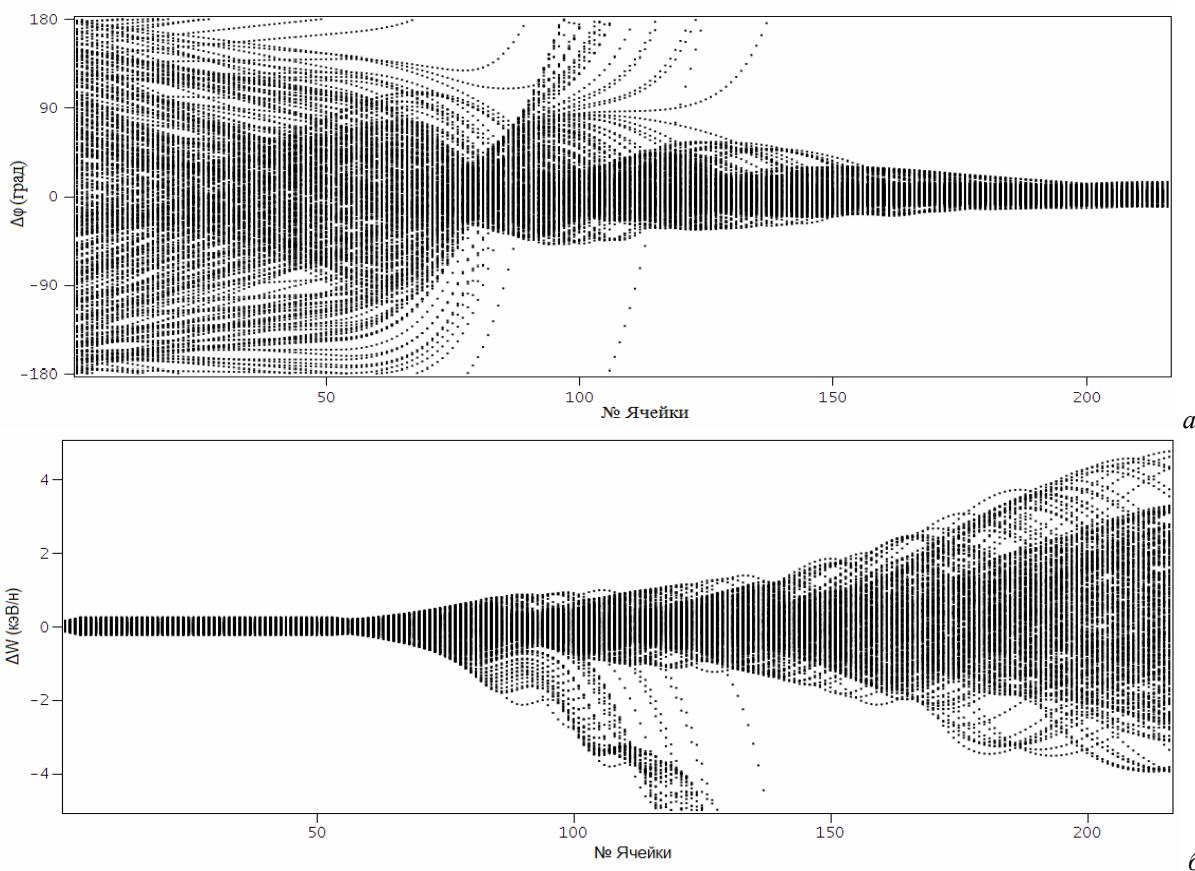


Рис.3. Изменение параметров пучка вдоль структуры ПОКФ: а – фазовый профиль; б – профиль энергий

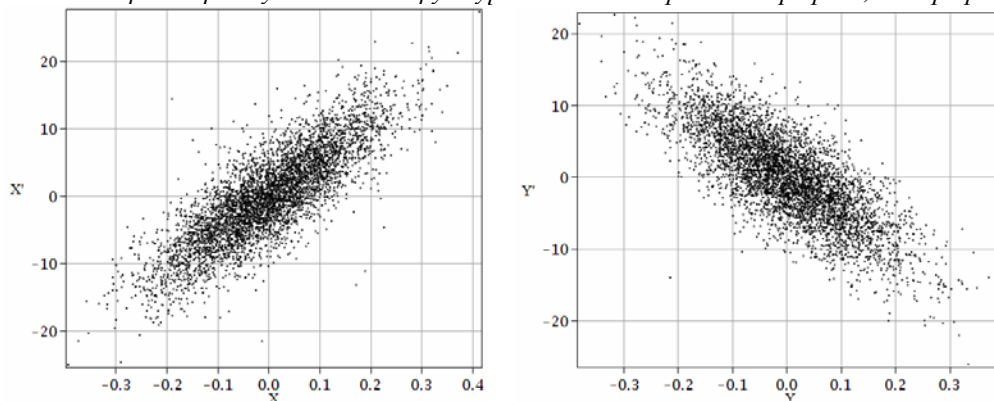


Рис.4. Радиальные эмиттансы пучка в плоскостях x и y

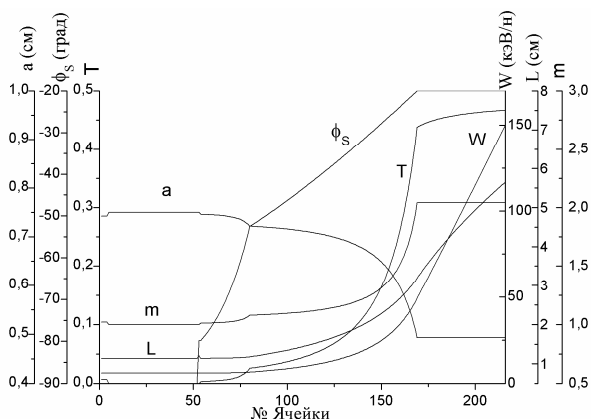


Рис.5. Основные параметры ускоряющей структуры ПОКФ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований по разработке оптимальных условий формирования пучка на начальной части структуры ПОКФ для ПОС-20 определены параметры участков shaper и prebuncher, обеспечивающие максимальный захват инжектируемого пучка в процесс ускорения, преобразуя радиальные и фазовые его параметры таким образом, что в основной части структуры ПОКФ имеет место эффективное ускорение с высоким темпом, позволяющим ускорять тяжелые ионы широкого диапазона масс $A/q \leq 20$. Инжектируемый пучок группируется неадиабатически на участке shaper, состоящий из не-

скольких ячеек с $m > 1,01$ и последующих немодулированных ячеек с $m = 1$. Такой вариант обеспечивает малую величину продольного эмиттанта при улучшении процесса производства без чрезмерно высоких требований к допускам. Параметры пучка на выходе из секции ПОКФ достигают величин, обеспечивающих его полный захват в последующие секции линейного ускорителя многозарядных ионов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. И.М. Капчинский, В.А. Тепляков // ПТЭ. 1970, №2, с.19.
2. И.М. Капчинский, В.А. Тепляков // ПТЭ. 1970, №4, с.17.
3. R.H. Stokes, et al. RF Quadrupole beam dynamics // *IEEE Trans.* 1979, v.NS-26, p.3469.
4. K.R. Crandell, et al. Quadrupole beam dynamics study // *Proc of LINAC, Mountauch.* 1979, p.2005.
5. В.А. Бомко, Б.В. Зайцев, Е.В. Ивахно и др. // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерная физика»* (54). 2010, №3, с.26-30.
6. S. Koscielniak. Design history of the isac rfq // *DESIGN NOTE TRI-DN-95-4.*
7. S. Yamada. Buncher section optimization of heavy ion RFQ linac // *Proc. 1989 Linear Conf.* Santa Fe, LA, 9234-C.

Статья поступила в редакцию 25.10.2011 г.

HEAVY IONS BEAMS FORMATION IN AN INITIAL PART OF ACCELERATING STRUCTURES PRE-STRIPPING SECTION THE MILAC LINEAR ACCELERATOR

V.A. Bomko, B.V. Zajtsev, A.P. Kobets, K.V. Pavlii, V.V. Panov

The report presents the results of studies on the development of a new pre-stripping section of the linear accelerator charged ions with the increased relation of their mass to charge $A/q = 20$, which will greatly expand the range of accelerated ions and increase the intensity of the beams. The structure is put in basis PSS-20 with Radio-Frequency Quadrupole (RFQ) focusing. The program is developed and performed optimisation calculations of structural parameters POKF providing an effective acceleration of ions with $A/q = 20$ from 6 to 150 keV/nucleon porous capture the acceleration in about 90 % of the injected beam.

ФОРМУВАННЯ ПУЧКІВ ВАЖКИХ ІОНІВ У ПОЧАТКОВІЙ ЧАСТИНІ ПРИСКОРЮЮЧОЇ СТРУКТУРИ ПЕРЕДОБДИРКОВОЇ СЕКЦІЇ ЛІНІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ЛУМЗІ

В.О. Бомко, Б.В. Зайцев, А.П. Кобець, К.В. Павлій, В.В. Панов

Наведено результати дослідження з розробки нової передобдиркової секції лінійного прискорювача багатозарядних іонів зі збільшеним відношенням їх маси до заряду $A/q = 20$, що дозволить значно розширити діапазон прискорюваних іонів і збільшити інтенсивність пучків. В основу ПОС-20 покладено структуру з просторово-однорідним квадрупольним фокусуванням ПОКФ (RFQ). Розроблено програму і виконані оптимізаційні розрахунки параметрів структури ПОКФ, що забезпечують ефективне прискорення іонів з $A/q = 20$ від 6 до 150 кеВ/нукл. при захваті в процес прискорення близько 90 % від інжектуємого пучка.