

## УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ ПРЕДОБДИРОЧНОЙ СЕКЦИИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ ЛУМЗИ

**В.А. Бомко, Б.В. Зайцев, А.Ф. Кобец, Ю.В. Мелешкова, К.В. Павлий, В.В. Панов**  
**Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,**  
**Харьков, Украина**  
**E-mail: kobets@kipt.kharkov.ua**

Проведены исследования по разработке новых вариантов структур для ускорения ионов с отношением массового числа к зарядовому  $A/q = 20$  в предобдирочной секции ПОС-20. На начальном участке ускорения ионов от 6 до 150 кэВ/нукл. высокий захват в процесс ускорения инжектированных ионов обеспечивает встречно-штыревая ускоряющая структура с пространственно-однородной высокочастотной квадрупольной фокусировкой. На втором участке ускорения ионов от 150 кэВ/нукл. до 1 МэВ/нукл. наиболее высокий темп ускорения создаёт встречно-штыревая ускоряющая структура с трубками дрейфа с модифицированной высокочастотной фокусировкой.

### ВВЕДЕНИЕ

Основной целью исследований является разработка комплекса на базе Харьковского линейного ускорителя тяжёлых ионов ЛУМЗИ для моделирования радиационных процессов в активной зоне ядерных реакторов, а также использование ускоренных пучков тяжёлых ионов для исследований в области ядерной физики и в прикладных целях.

В настоящее время линейный ускоритель ЛУМЗИ ускоряет ионы от  $He^+$  до  $Ar_{40}^{3+}$ , т.е. ионы тех элементов, которые можно получать в источнике ионов соотношением массового числа к заряду  $A/q \leq 15$ . На выходе из системы инжекции энергия ионов составляет 30 кэВ/нукл., а после ускорения в существующей предобдирочной секции ПОС-15 – 0,975 МэВ/нукл. При такой энергии ионы подвергаются обдирке, т.е. проходят через тонкую углеродную плёнку, где их заряд увеличивается в пределах  $A/q \leq 5$  и, после ускорения в основной секции ОС-5, энергия ионов составляет 8,5 МэВ/нукл. Интенсивность ускоренного до такой энергии пучка составляет  $10^9 \dots 10^{10}$  частиц/с и существенно уменьшается для ионов с массовым числом выше 40. Такая величина тока ускоренных ионов обусловлена устаревшим методом сеточной фокусировки на всём протяжении предобдирочной секции ПОС-15.

Ставится задача получения ускоренных пучков тяжёлых ионов со следующими основными параметрами:

- энергия ионов – 1 и 8,5 МэВ/нукл.;
- ионы элементов: He, Ba, C, N, Ar, Cr, Fe, Ni и др.
- средняя интенсивность пучка –  $10^{12} \dots 10^{13}$  частиц/с.

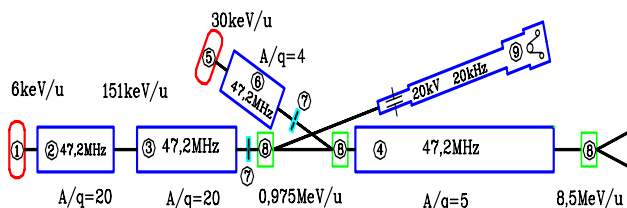


Рис.1. Перспективная схема линейного ускорителя ЛУМЗИ

На Рис.1 приведена перспективная схема линейного ускорителя ЛУМЗИ, на которой изображены два новых участка предобдирочной секции ПОС-20,

на первом из которых используется ускоряющая структура с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой ПОКФ(RFQ), а на втором – ускоряющая структура с трубками дрейфа. На всех секциях линейного ускорителя ЛУМЗИ используется встречно-штыревая ускоряющая структура.

### УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА С ПРОСТРАНСТВЕННО-ОДНОРОДНОЙ КВАДРУПОЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКОЙ ПОКФ

Ускоряющая структура с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой ПОКФ, предложенная И.М. Капчинским и В.А. Тепляковым [1,2], в настоящее время используется почти во всех существующих линейных ускорителях тяжёлых ионов. Основные конструктивные особенности и методические разработки были выполнены во многих ускорительных лабораториях, особенно интенсивно велось изучение такой ускоряющей структуры в Лос-Аламосе, где были созданы все основные предпосылки для сооружения структуры RFQ на участках формирования и начального ускорения сильно-точных пучков [3,4]. Согласно этим разработкам вся секция RFQ делится на 4 участка: радиальный согласователь (radial matcher), фазовый формирователь (shaper), участок адиабатической группировки (center bancher) и участок ускорения (accelerating section). Однако, в случае ускорения тяжёлых ионов (больших  $A/q$ ) участок адиабатической группировки требует большого количества ячеек, располагаемых на большой длине. Задача сокращения общей длины создаваемой предобдирочной секции ПОС-20 вместе с системой инжекции стоит очень остро ввиду ограниченной длины существующей предобдирочной секции ПОС-15. В то же время, в линейном ускорителе тяжёлых ионов интенсивность тока пучка значительно ниже, чем в протонных ускорителях, следовательно, силы пространственного заряда не столь важны и может быть использована другая схема группировки, обеспечивающая более высокий темп ускорения без ухудшения радиально-фазовых характеристик пучка. Такая схема ускорения была предложена S. Yamada, в которой участок группировки делится на два: prebancher и bancher [5]. В

prebancher совершается быстрая фазовая компрессия, протекающая на половине периода фазовых колебаний. На участке bancher стремятся создать как можно высокий темп ускорения, не ухудшая при этом радиальные и фазовые характеристики пучка. Вводится также участок buster, где достигается максимальный темп ускорения.

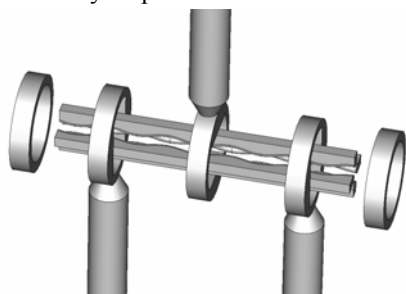


Рис.2. Схематический вид участка структуры ПOKФ для ПОС-20

Такой вариант построения участков предобдирочной секции ПОС-20 разработан применительно к ускорению тяжёлых ионов с  $A/q=20$ . При этом для каждого из 6 участков созданы программы расчёта параметров структуры и характеристики пучка ионов. Результаты оптимизационных расчётов структуры приводятся в докладе, представленном на эту конференцию [6]. На Рис.2 представлен схематический вид участка ускоряющей структуры ПOKФ для ПОС-20, а на Рис.3 представлен общий вид этой структуры.

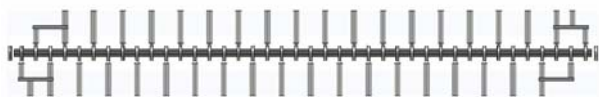


Рис.3. Общий вид структуры ПOKФ для ПОС-20

Энергия ионов на выходе из ПOKФ составляет 150 кэВ/нукл., общая длина ускоряющей структуры ПOKФ равна 468 см, суммарное количество ячеек – 208. Следует отметить хорошие характеристики ускоренного пучка ионов, обеспечивающие полный его захват в следующем участке ускорения в структуре с трубками дрейфа.

### УЧАСТОК УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ ПОС-20 С ТРУБКАМИ ДРЕЙФА

На участке ПОС-20 с трубками дрейфа используется встречно-штыревая ускоряющая структура, возбуждаемая на волне  $H_{111}$ , характерной особенностью которой является значительное увеличение рабочей длины волны, что особенно важно в случае ускорения тяжёлых ионов с высоким отношением  $A/q$ . Этой структуре свойственно экономное расходование высокочастотной мощности. Кроме того, ускорение осуществляется на  $\pi$ -волне, что позволяет получить наиболее высокий темп ускорения.

Изучалась возможность использования различных вариантов фокусировки пучка в процессе ускорения. В результате было решено в основу участка ускорения с трубками дрейфа положить модифицированный вариант сеточной фокусировки, который позволяет построить новую предобдирочную секцию с величиной  $A/q = 20$  в рамках имеющегося в наличии ограниченного продольного размера в на-

ISSN 1562-6016. БАИТ. 2012. №4(80)

чальной части ускорителя ЛУМЗИ. При этом учитывался такой недостаток сеточного варианта, как потери пучка за счёт столкновений с сетками. Однако использование его становится рациональным, если участок с трубками дрейфа начинать после ускорения ионов в структуре ПOKФ, которая обеспечивает высокий захват инжектируемого пучка и формирует приемлемые радиально-фазовые характеристики.

Наличие участка ПOKФ упрощает проблему ускорения ионов, получивших энергию 150 кэВ/нукл. При длине волны  $\lambda = 6,36$  м длина первого периода в структуре с трубками дрейфа составит 5,78 см. Продольный прирост размеров ячеек осуществляется уже в более высоком темпе, поэтому количество трубок дрейфа сокращается. Фазовая протяжённость пучка ионов после ПOKФ уже составляет около  $20^\circ$ , а его радиус 4 мм. Это даёт возможность рассчитать структуру ячеек на значительно повышенную величину синхронной фазы, что, соответственно, увеличивает темп ускорения и понижает фактор дефокусировки частиц.

Конструкция сеток выбиралась с учётом эффективности их фокусирующего действия, величины трансмиссии пучка и простоты изготовления и монтажа. Их количество определялось в процессе расчёта оптимального фокусирующего воздействия.

Важной особенностью сеточного варианта ускоряющей структуры с трубками дрейфа является значительное уменьшение требований к точности изготовления, монтажа и юстировки трубок дрейфа по сравнению с вариантами фокусировки магнитными и, особенно, ВЧ-квадруполями.

Таблица 1  
Основные параметры структуры

Энергия ионов на входе, кэВ/нукл.	150
Энергия ионов на выходе, кэВ/нукл.	975
Отношение массового числа к зарядовому, $A/q$	20
Рабочая частота, МГц	47,2
Синхронная фаза, град	-10
Количество трубок дрейфа	42
Длина резонатора, см	422,9
Темп ускорения, МэВ/м	2,9
Эмиттанс пучка на входе, $\mu\text{м}\cdot\text{мм}\cdot\text{мрад}$	0,456
Эмиттанс пучка на выходе, $\mu\text{м}\cdot\text{мм}\cdot\text{мрад}$	0,84
Продольный захват, %	90
Прозрачность сеток	0,5
Общий захват, %	45
Ток ускоренных ионов на входе, мА	10
Ток ускоренных ионов на выходе, мА	4,5

Выполнен расчёт ускоряющей структуры с трубками дрейфа, в процессе которого определены её геометрические параметры и основные характеристики пучка. В Табл.1 сведены основные параметры структуры. Общая длина структуры DTL составляет 422,9 см, количество ячеек – 42. Вся структура разделена на 9 групп, которые отличаются наличием или отсутствием фокусирующих сеток. Синхронная фаза на всех участках составляет  $10^\circ$ . Схематический вид ускоряющей структуры с трубками дрейфа приведен на Рис.4.

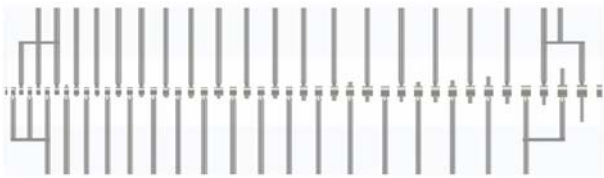


Рис.4. Схематический вид ускоряющей структуры с трубками дрейфа

В процессе расчёта динамики ионов определялись фазовые и радиальные характеристики вдоль каждой группы ячеек. На Рис.5 приведен фазовый портрет пучка на выходе ПОС-20, а на Рис.6 – радиальные траектории пучка.

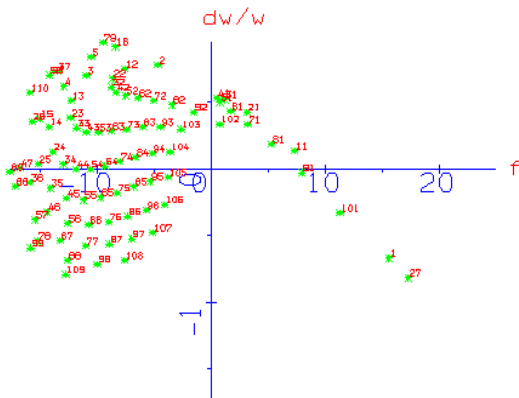


Рис.5. Фазовый портрет пучка на выходе ПОС-20

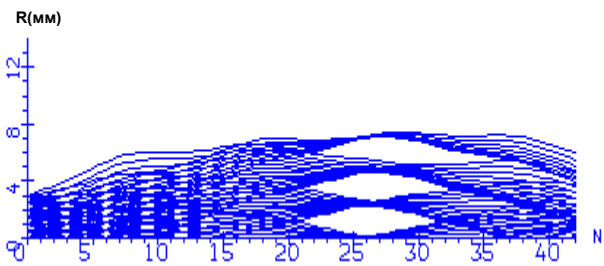


Рис.6. Радиальные траектории пучка ускоряющей структуры с трубками дрейфа ПОС-20

Результаты расчетов показывают, что такая структура в комбинации с участком ПОКФ является эффективной для создания новой предобдирочной секции ПОС-20 для линейного ускорителя ЛУМЗИ. Определена общая трансмиссия вдоль всего канала ПОС-20, учитывая величину захвата инжектируемого пучка и его потери на 22 сетках при общем количестве трубок дрейфа 42. Таким образом, на выходе из предобдирочной секции ПОС-20, согласно расчётам, будет ускорено около 50 % инжектированного пучка тяжёлых ионов. Например, для ионов азота  $N^+$  при такой трансмиссии на выходе предобдирочной секции ПОС-20 будет получено  $10^{13}$  частиц/с. Учитывая потери на обдирочной фольге при надёжной работе системы авторегулирования ВЧ-фазы, амплитуды и частоты ток ионов после ускорения в основной секции до энергии 8,5 МэВ/нукл. составит  $10^{12}$  частиц/с.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ С ТРУБКАМИ ДРЕЙФА

Ускоряющая структура встречно-штыревого типа представляет собой большую ёмкостную и индуктивную нагрузку резонатора, что приводит к значительному (почти в 3 раза) понижению его резонансной частоты. При этом имеет место значительный сдвиг собственной частоты ячеек структуры, который зависит от их длины. В резонаторах, рассчитанных на прирост скорости ионов в 2-3 раза, относительное изменение собственной частоты от входного конца к выходному может составить более 50%.

Задача настройки заключается не только в обеспечении необходимой рабочей частоты, но и в компенсации понижения уровня поля на концах резонатора, свойственного Н-структурам. Поэтому требуются эффективные методы настройки, которые позволяют компенсировать указанные отклонения и достичь рабочей частоты.

Основная цель математических расчетов заключалась в определении диаметра резонатора, диаметра трубок дрейфа и конфигурации необходимых модификаций настроечных устройств, применение которых обеспечивает равномерное распределение ускоряющего поля вдоль зазоров структуры и получение рабочей частоты 47,2 МГц.

Поставленные задачи были решены путём интерполяционных расчётов, в которых последовательно включались конструктивные варианты элементов настройки: диаметр резонатора, концевые резонансные элементы настройки (КРЭН), а также разработанные в процессе исследований новые индуктивно-ёмкостные элементы настройки – «контрики»(contrivance), которые показали высокую эффективность применительно к различным вариантам ускоряющей структуры встречно-штыревого типа – структуры RFQ, DTL и другие. Настроечные элементы в этом случае представляют собой конструкцию в виде стержней, которые расположены на стороне трубок дрейфа, противоположной их подвесочным штангам крепления к резонатору. Они образуют при этом дополнительную индуктивно-ёмкостную нагрузку, которая производит соответствующее понижение собственных частот ячеек и локальное увеличение электрического поля.

Расчёт геометрических и электродинамических характеристик ускоряющей структуры выполнялся в 3-мерном варианте. В результате процесса последовательного определения действия каждого из элементов настройки методом математического моделирования были определены геометрические параметры всех элементов ускоряющей структуры. Эти исследования позволили получить расчётную частоту 47,2 МГц и сформировать ускоряющее поле, распределение которого приведено на Рис.7.

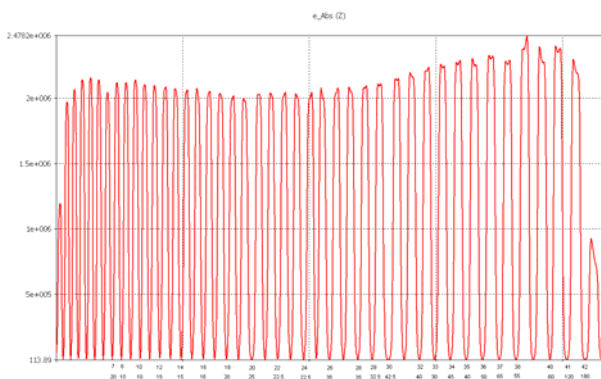


Рис.7. Распределение ускоряющего поля вдоль структуры с трубками дрейфа ПОС-20

### ВЫВОДЫ

В результате исследований по разработке ускоряющей структуры новой предобдирочной секции ПОС-20 для линейного ускорителя ЛУМЗИ созданы предпосылки для её сооружения. Разработана методика расчёта параметров двух частей встречно-штиревой структуры, базирующихся на пространственно-однородной квадрупольной фокусировке (RFQ) и структуре с трубками дрейфа (DTL). Эти две структуры обеспечивают как эффективное формирование пучка тяжёлых ионов, так и высокий темп ускорения, что позволит на существующей площади с ограниченной длиной около 9 м ускорять тяжёлые ионы с отношением массового числа к за-

рядовому  $A/q \leq 20$  до энергии 1 МэВ/нукл. Будут продолжены исследования по оптимизации параметров предобдирочной секции ПОС-20 в направлении совмещения разнородных участков RFQ и DTL в одном резонаторе. Создание такой предобдирочной секции значительно повысит возможности линейного ускорителя ЛУМЗИ при использовании его в фундаментальных научных исследованиях и в прикладных целях.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. И.М. Капчинский, В.А. Тепляков // ПТЭ. 1970, №2, с.19.
2. И.М. Капчинский, А.В. Тепляков // ПТЭ. 1970, №4, с.17.
3. R.H. Stokes, et al. RF Quadrupole beam dynamics // *IEEE Trans. NS-26*. 1979, p.3469.
4. K.R. Crandell, et al. Quadrupole beam dynamics study // *Proc of LINAC*. 1979, Montauch, p.2005.
5. S. Yamada. Buncher section optimization of heavy ion RFQ linac // *Proc. 1989 Linear Conf. Santa Fe, LA*, 9234-C.
6. В.А. Бомко, Б.В. Зайцев, А.Ф. Кобец, К.В. Павлий, В.В. Панов. Формирование пучков тяжёлых ионов в начальной части ускоряющей структуры предобдирочной секции линейного ускорителя ЛУМЗИ // *Наст. вып.* с.15-19.

Статья поступила в редакцию 06.10.2011 г.

### ACCELERATING STRUCTURES PRE-STRIPPING SECTION THE MILAC HEAVY ION LINEAR ACCELERATOR MILAC

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

Researches on development of new variants of accelerating structures for acceleration of the ions with  $A/q=20$  in pre-stripping section PSS-20 are carried out. On an initial part of acceleration of ions from 6 up to 150 keV/u high capture in process of acceleration of the injected ions is provided interdigital (IH) accelerating structure with Radio-Frequency Quadrupole (RFQ) focusing. On the second part of acceleration of ions from 150 keV/u up to 1 MeV/u the highest rate of acceleration is created interdigital (IH) accelerating structure with drift tubes with the modified radio-frequency focusing.

### ПРИСКОРЮЮЧИ СТРУКТУРИ ПЕРЕДОБДИРКОВОЇ СЕКЦІЇ ЛІНІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ВАЖКИХ ІОНІВ ЛУМЗІ

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

Проведені дослідження по розробці нових варіантів структур для прискорення іонів з відношенням масового числа до зарядового  $A/q=20$  в передобдирковій секції ПОС-20. На початковій частині прискорення іонів від 6 до 150 кеВ/нукл. високий захват у процес прискорення інжекттованих іонів забезпечує зустрічно-штирєва прискорююча структура з просторово-однорідним високочастотним квадрупольним фокусуванням. На другій частині прискорення іонів від 150 кеВ/нукл. до 1 МеВ/нукл. найбільш високий темп прискорення створює зустрічно-штирєва прискорююча структура з трубками дрейфу з модифікованим високочастотним фокусуванням.