

## ГРУППИРОВАТЕЛЬ ПУЧКА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ДЕЙТРОНОВ

*Е.В. Гусев, П.А. Демченко, Н.Г. Шулика, О.Н. Шулика*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Харьков, Украина*

*E-mail: demchenko@kipt.kharkov.ua*

Для увеличения коэффициента захвата пучка линейным ускорителем дейтронов с переменнo-фазовой фокусировкой рассчитан высокочастотный группирователь и проведено численное моделирование динамики частиц в этом устройстве. Группирователь представляет собой  $H$ -резонатор с трубками дрейфа, расположенными на плоских гребенчатых подвесках. Радиальная устойчивость пучка в процессе группировки обеспечивается знакопеременным электростатическим полем между соседними трубками дрейфа. Эффект фокусировки достигается за счет дополнительной подачи на трубки дрейфа чередующегося электростатического потенциала.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

При разработке линейных ионных ускорителей для технологических целей (производства радиоизотопов, трансмутации радиоактивных отходов ядерного топливного цикла, электроядерного метода получения энергии) одной из проблем является построение начальной части ускорителя (НЧУ). Основная функция НЧУ состоит в начальной группировке инжектируемого низкоэнергетичного пучка и его предварительном ускорении до энергий, при которых конструкция резонансной ускоряющей структуры позволяет разместить в ней устройства фокусировки пучка, в частности, магнитные квадрупольные линзы.

Для обеспечения максимального коэффициента захвата частиц резонансной секцией линейного ускорителя необходимо согласовать фазовые характеристики пучка с аксептансом и сепаратрисой секции. Как правило, для согласования с аксептансом первой секции необходимо иметь сходящийся по радиусу пучок с требуемыми значениями эмиттанса, угла сходимости и радиуса (поперечное согласование). Одновременно, при выбранной рабочей частоте ускорителя, для продольного согласования необходимо, чтобы длительность формируемых сгустков частиц (банчей) на входе секции не превышала значений, определяемых её сепаратрисой.

В настоящее время в качестве начальной части сильноточных ионных ускорителей, как правило, используются структуры с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ) [1]. Они обеспечивают высокий коэффициент захвата частиц в режим резонансного ускорения (до 90% и выше) при сравнительно низкой энергии инжектируемых ионов (50...100 кэВ/нукл.). Группировка, фокусировка и предварительное ускорение пучка осуществляются одним и тем же высокочастотным (ВЧ) электрическим полем. Однако ПОКФ-структуры являются сложными в изготовлении и настройке, требуют высоких напряженностей ВЧ-поля для фокусировки и ускорения пучка, имеют относительно малое шунтовое сопротивление и низкий темп ускорения.

В ННЦ ХФТИ в течение ряда лет для ускорения

пучков средней интенсивности исследуется возможность построения начальной части линейных ускорителей ионов с использованием группирователя (банчера) специальной конструкции и ускоряющей секции. Ускоряющая секция представляет собой  $H$ -резонатор с трубками дрейфа, в котором устойчивость движения ионов достигается за счет применения модифицированной переменнo-фазовой фокусировки (МПФФ) [2].

В настоящей работе рассматривается конструкция и динамика пучка в устройстве, которое позволяет одновременно решать вопросы группировки инжектируемого пучка и согласования его поперечного фазового объема с параметрами первой ускоряющей секции линейного ускорителя дейтронов. Ускоритель дейтронов с выходной энергией 23 МэВ рассматривался в качестве драйвера подкритической урановой сборки электроядерного источника нейтронов ННЦ ХФТИ [4-6].

### 2. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ УСТРОЙСТВА

Конструкция группирователя-согласователя схематично представлена на Рис.1. Он состоит из двух автономных, последовательно включенных узлов: высокочастотного банчера  $A1$ , представляющего собой объемный  $H$ -резонатор, нагруженный трубками дрейфа, и согласователя, которым является многоэлектродная аксиально-симметричная электростатическая линза  $A2$  с чередующимся значением потенциала электродов.

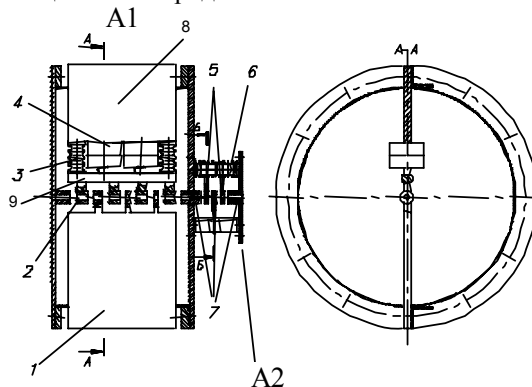


Рис. 1. Группирователь-согласователь

В резонаторе банчера трубки дрейфа 2 поочередно расположены на держателях 1 и 9 типа “гребёнка”, разность потенциалов между которыми образует  $\pi$ -моду распределения напряженности ВЧ-поля вдоль оси устройства [3]. Резонансная частота, на которой возбуждается банчер, совпадает с рабочей частотой секций ускорителя.

Важной проблемой при разработке банчера, содержащего несколько высокочастотных периодов группировки (трубка дрейфа и зазор), является обеспечение радиальной устойчивости пучка и, соответственно, минимальных потерь тока ионов. В рассматриваемом диапазоне энергий инъекции протонных и дейтронных пучков (70...100 кэВ) для обеспечения фокусировки пучка в устройстве группировки было использовано электростатическое поле с чередованием потенциала на трубках дрейфа. Для этого на чётные трубки дрейфа 2 подавалось отрицательное напряжение смещения относительно корпуса резонатора; на нечетных трубках имелась только ВЧ-составляющая потенциала  $U$ . Держатель, на котором располагалась группа трубок с четными номерами, был разделен на две части. Одна часть держателя 9 с расположенными на ней трубками 2, выполненная в форме гребенки, была отделена изоляторами 3 от другой плоской части 8, гальванически связанной с объёмным резонатором.

Электростатический потенциал  $U_b$  на эту гребёнку подавался через индуктивно-емкостную развязку, исключающую шунтирование резонатора банчера внутренним сопротивлением источника высоковольтного питания. Связь изолированной по постоянному напряжению гребенки 9 с ВЧ-полем, возбуждаемым в резонаторе внешним генератором, осуществлялась через разделительные конденсаторы 4.

Таким образом, результирующее поле банчера, действующее на частицы пучка, являлось суперпозицией ВЧ-поля, обеспечивающего группировку ионов вблизи фазы синхронной частицы, и фокусирующего знакопеременного электростатического поля.

Для согласования сгруппированного пучка с акцептансом первой секции линейного ускорителя, непосредственно между банчером и первой секцией располагалось согласующее устройство (согласователь) А2. Конструктивно банчер и согласователь представляют общий модуль. Согласователь является многоэлектродной аксиально-симметричной электростатической линзой с чередующимся потенциалом электродов 5 и 7. На электроды 5, относительно заземлённых электродов 7, подается фокусирующий отрицательный потенциал  $U_m$ . Величина потенциала  $U_m$  определяется из условия максимального захвата тока пучка в режим ускорения первой секцией резонансного ускорителя.

Автономные источники питания фокусирующих напряжений банчера  $U_b$  и согласователя  $U_m$  позволяют независимо регулировать динамику ионного пучка в этих устройствах и, соответственно, осуществлять требуемую

трансформацию шестимерного фазового объёма формируемых пучков.

При выключении ВЧ-питания банчера, электростатическое поле между трубками дрейфа образует последовательность ускоряющих и замедляющих зазоров, которые формируют фокусирующий канал. Таким образом, данная многоэлектродная линза может быть использована как устройство транспортировки пучка без группировки частиц в направлении продольного движения. В этом случае возможна только трансформация поперечных характеристик фазового объёма пучка.

### 3. ДИНАМИКА ПУЧКА В ГРУППИРОВАТЕЛЕ

Для выбора конструкционных параметров банчера-согласователя НЧУ дейтронного ускорителя было проведено численное моделирование динамики пучка в этом устройстве, с целью достижения максимального коэффициента захвата частиц в режим ускорения. Основные расчётные характеристики банчера включали: число периодов группировки и значения фазы синхронной частицы  $\varphi_s$  в них; размеры трубок дрейфа, зазоров между ними и диаметра апертуры; значения амплитуды ВЧ-потенциала  $U$  и фокусирующего напряжения  $U_b$  на трубках дрейфа; геометрические размеры резонатора.

Оптимизация характеристик банчера проводилась для конкретных параметров первой секции линейного ускорителя-драйвера с выходной энергией дейтронов 23 МэВ [4,5]. Её основные физические и конструкционные параметры были рассчитаны ранее.

Первая секция представляла собой цилиндрический  $H$ -резонатор с рабочей частотой 152 МГц, длиной 1,93 м, нагруженный трубками дрейфа. Конструкция ускоряющей структуры соответствовала  $\pi$ -волне электрического поля вдоль оси резонатора. Энергия инъекции дейтронов составляла  $W_0=72,5$  кэВ, выходная энергия секции  $W_1=1,29$  МэВ, ток инъекции  $I_0=15$  мА, нормализованный эмиттанс пучка  $\varepsilon_n=0,2$  мм·мрад, угол захвата частиц по фазам  $\Delta\varphi=110^\circ$ , средняя напряжённость электрического поля в ускоряющих зазорах не превышала 25,5 кВ/см. Таким образом, коэффициент захвата пучка в режим ускорения не превышал  $\kappa=30,5\%$ .

Для согласования характеристик поперечного движения, на входе в секцию необходимо иметь инжектируемый пучок с углом сходимости 15 мрад и диаметром 5 мм.

Сравнительно низкий коэффициент захвата был обусловлен компромиссом при выборе темпа ускорения, величины ускоряемого тока и распределения фазирующих и фокусирующих периодов ускоряющей секции. В данной работе рассматривалась ускоряющая секция с переменнo-фазовой фокусировкой, при отсутствии предварительной группировки инжектируемого пучка.

### 3.1. ПРОДОЛЬНАЯ ДИНАМИКА ПУЧКА В БАНЧЕРЕ-СОГЛАСОВАТЕЛЕ

На основании результатов численного моделирования динамики пучка были определены физико-технические характеристики как банчера  $A1$ , так и согласователя  $A2$  (см. Рис.1), при которых достигался максимальный коэффициент захвата пучка дейтронов в режим ускорения первой секцией. В частности, длина резонатора банчера составляла 255 мм, диаметр 40 см, количество группирующих периодов 8, амплитуда ВЧ-напряжения между трубками дрейфа  $U \approx 5,2$  кВ.

Так как продольное распределение ВЧ-поля в банчере соответствует  $\pi$ -волне, то длина группирующих периодов должна быть кратной  $\beta\lambda/2$ , где  $\lambda$ -длина волны,  $\beta = v/c$ ,  $v$ -скорость частиц,  $c$ -скорость света. При выбранных значениях рабочей частоты  $f=152$  МГц и энергии инжекции дейтронов  $W_0=72,5$  кэВ  $\beta\lambda/2=0,87$  см. Поэтому, чтобы увеличить размеры трубок дрейфа (длины, диаметры, радиусы закруглений электродов) и, соответственно, акцептанс банчера и электрическую прочность зазоров, период группировки был выбран  $3\beta\lambda/2$  (кратный дрейф).

Оптимальное фокусирующее напряжение для транспортировки пучка через банчер составляет  $U_b=50$  кВ.

Согласователь  $A2$ , расположенный после банчера  $A1$ , представлял собой 4-электродную линзу (см. Рис.1). Согласование поперечного фазового объёма пучка с акцептансом первой секции достигалось при потенциале чётных электродов 5, равном  $U_m=-41$  кВ, относительно заземлённых электродов 7.

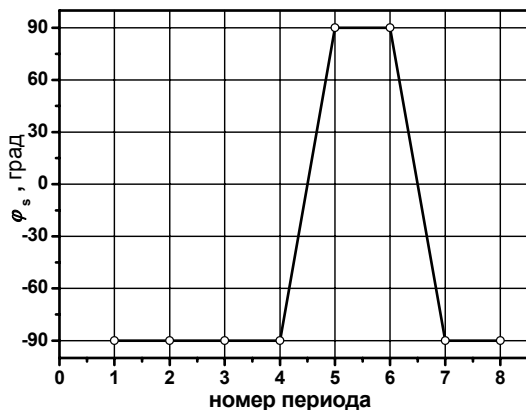


Рис. 2. Зависимость синхронной фазы от номера периода

На Рис.2 представлены значения фазы  $\varphi_s$  синхронной частицы в зависимости от номера группирующего зазора. Соответственно на Рис.3 показано изменение фазовой протяжённости сгустков по мере прохождения группирующих зазоров.

Как следует из распределения (см. Рис.2), не все периоды группирователя являются фазирующими ( $\varphi_s = -90^\circ$ ). В данном случае зазоры 5 и 6 синхронная частица проходит при положительных значениях фазы электрического поля  $\varphi_s = +90^\circ$ , т.е. периоды являются фокусирующими. Это позволило уменьшить энергетический разброс частиц при

группировке пучка и, соответственно, увеличить коэффициент захвата частиц ускоряющей секцией.

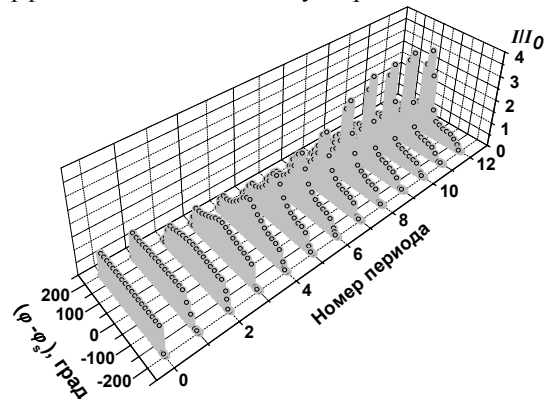


Рис. 3. Эволюция амплитуды и фазовой протяжённости сгустков при прохождении группирующих зазоров

Изменение продольных характеристик инжектируемого пучка в процессе группировки и прохождения согласователя иллюстрирует Рис.4, на котором представлены проекции фазового объёма на продольную плоскость на выходе банчера и после прохождения согласователя. Здесь  $W, W_s$  – энергии частиц пучка и синхронной частицы соответственно,  $\varphi - \varphi_s$  – отклонение фазы частицы от синхронного значения. При моделировании динамики использовался ансамбль, включающий  $10^4$  дейтронов.

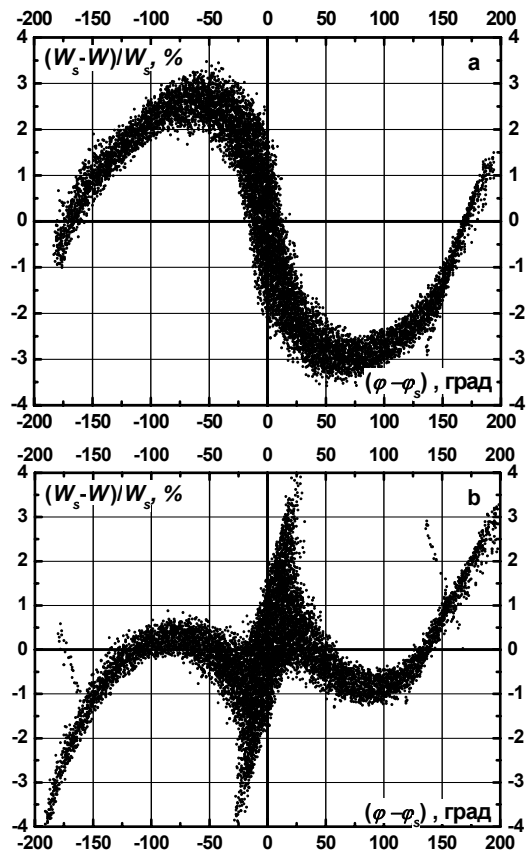


Рис. 4. Проекция фазового объёма пучка на продольную плоскость: а – на выходе банчера, б – на выходе согласователя

Как следует из Рис.4, на выходе банчера формируются сгустки, сходящиеся в направлении

движения (Рис.4,а). После прохождения согласователя (участка дрейфа) приблизительно образуется продольный кроссовер пучка (Рис.4,б).

Уменьшение величины энергетического разброса частиц после дрейфа пучка в согласователе (Рис.4,б) является следствием влияния объёмного заряда ступок на характеристики продольного движения (уменьшение скорости компрессии банчей).

Таким образом, в интервале фаз  $-60^\circ \leq \varphi \leq +60^\circ$ , который соответствует области захвата ускоряющей секцией, можно собрать до 70% и более частиц инжектируемого пучка.

### 3.2. ПОПЕРЕЧНАЯ ДИНАМИКА ПУЧКА В БАНЧЕРЕ-СОГЛАСОВАТЕЛЕ

Эффект фокусировки (*поперечная устойчивость*) пучка дейтронов с током  $I_0=15$  мА и энергией инжекции  $W_0=72,5$  кэВ знакопеременным аксиально-симметричным электростатическим полем банчера и согласователя иллюстрирует Рис.5.

На Рис.5 представлены огибающие пучка для нескольких значений доли  $I/I_0$  полного тока инжекции  $I_0$ . Пунктирная вертикальная линия на Рис.5 разделяет области банчера и согласователя. Здесь же показаны геометрия и расположение трубок дрейфа и электродов согласователя.

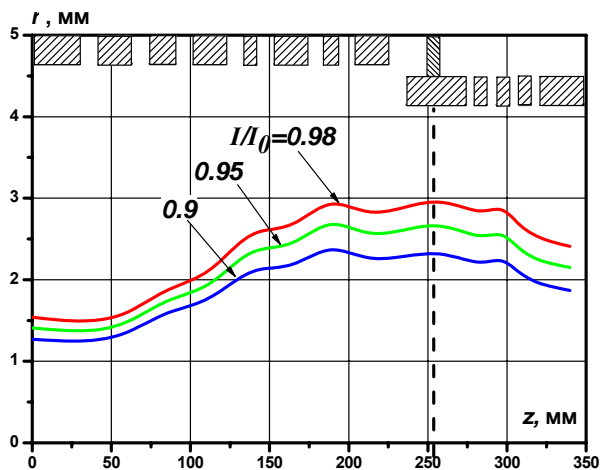


Рис. 5. Огибающие пучка в банчере - слева и согласователе (слева - трубки дрейфа, справа - электроды согласователя)

Анализ поперечной динамики (Рис.5) свидетельствует, что через канал, образуемый трубками дрейфа банчера и электродами согласователя, можно без потерь транспортировать пучок дейтронов с заданными параметрами, если подобрать необходимые значения фокусирующих потенциалов  $U_b$  и  $U_m$ . При этом на выходе согласователя можно получить пучок с углом сходимости и диаметром, необходимыми для согласования с акцептансом ускоряющей секции.

Исследовалась возможность исключения из рассматриваемого устройства согласователя А2 (Рис.1) с целью упрощения конструкции. Однако в этом случае для получения непосредственно на выходе банчера требуемых для согласования с ускорителем сходимости и диаметра пучка необходимо существенно увеличить жёсткость электростатической фокусировки за счёт

увеличения фокусирующей разности потенциалов. Расчёты показывают, что вследствие роста напряжения возникают проблемы, связанные с электрическим пробоем группирующих зазоров и электрической прочностью разделительных конденсаторов банчера.

Трансформация поперечного сечения фазового объёма пучка на участке от среза банчера до выхода согласователя показана на Рис.6.

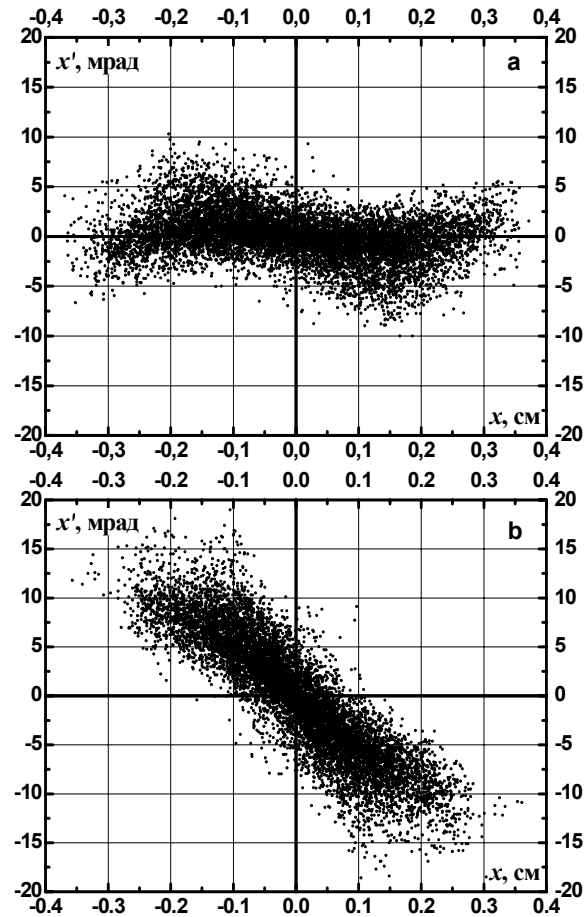


Рис. 6. Проекция фазового объёма пучка на поперечную плоскость  $x-x'$ : а - на выходе банчера, б - на выходе согласователя

При выбранном значении фокусирующего напряжения  $U_b=-50$  кВ на выходе банчера образуется поперечный кроссовер (Рис.6,а), что недостаточно для формирования пучка с углом сходимости 15 мрад и диаметром 5 мм на входе первой секции линейного ускорителя.

Увеличение потенциала на электродах согласователя до  $U_m=-41$  кВ позволяет осуществить требуемую трансформацию фазового объёма пучка.

Анализ результатов численного моделирования динамики пучка дейтронов в рассмотренной конструкции группирователя и согласователя свидетельствует, что применение этого устройства позволяет увеличить коэффициент захвата частиц в режим ускорения с 30,5 до 70,8%, что соответствует току на выходе первой секции ускорителя-драйвера 10,6 мА.

Данное значение тока было выбрано с учётом работы ускорителя в непрерывном режиме. Это обстоятельство накладывало определённые

ограничения на величину ускоряемого тока, которые были связаны, в частности, с наличием источников ВЧ-питания, требуемой мощности и проблемой теплосъёма с мишени-конвертора нейтронов [4-6].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрена конструкция и особенности динамики частиц в устройстве для согласования пучка инжектора с ускоряющей секцией линейного ускорителя дейтронов, имеющей конкретные характеристики в шестимерном фазовом пространстве.

При разработке НЧУ-сильноточных линейных ускорителей ионов с использованием банчера с суперпозицией группирующего высокочастотного и фокусирующего знакопеременного электростатического поля одной из основных характеристик является величина тока, который можно группировать и транспортировать с помощью данного устройства.

Максимальное значение тока, который можно транспортировать без потерь, определяется жёсткостью фокусирующего канала и ионно-оптическими характеристиками инжектируемого пучка. В случае знакопеременного электростатического поля оптическая сила многоэлектродной линзы определяется разностью потенциалов между электродами и числом фокусирующих зазоров. Таким образом, одним из факторов, ограничивающих ток, является электрическая прочность вакуумных зазоров, изоляции трубок дрейфа относительно резонатора и разделительных конденсаторов.

Требования к прочности изоляции трубок дрейфа и конденсаторов можно снизить, если использовать симметричную подачу фокусирующей разности потенциалов  $-U_m/2$  и  $+U_m/2$  на соседние трубки дрейфа. Однако в этом случае тормозящие зазоры и смежные с ними трубки дрейфа частицы проходят при энергии меньше энергии инжекции  $W_0$ . Следствием является дополнительная дефокусировка и рост эффективного эмиттанса под действием собственного объёмного заряда пучка.

## BUNCHER OF LINEAR DEUTERON ACCELERATOR

*Ye.V. Gussev, P.O. Demchenko, N.G. Shulika, O.N. Shulika*

To increase a beam transmission factor of linear deuteron accelerator based on an alternating phase focusing, an RF-buncher has been proposed and calculated. Particle dynamics in the buncher was investigated numerically. The buncher was an  $H$ -cavity loaded by an interdigital drift tube structure. Electrostatic electric field alternating between two consecutive drift tubes provided radial beam stability. Focusing effect has been achieved by applying of additional alternating electrostatic potential to the drift tubes.

## ГРУПУВАЧ ПУЧКА ЛІНІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ДЕЙТРОНІВ

*Є.В. Гусєв, П.О. Демченко, М.Г. Шуліка, О.М. Шуліка*

Для збільшення коефіцієнта захоплення пучка лінійним прискорювачем дейтронів із змінно-фазовим фокусуванням розраховано високочастотний групувач і проведено чисельне моделювання динаміки частинок у цьому пристрої. Групувач являє собою  $H$ -резонатор з трубками дрейфу, розташованими на плоских гребінчастих підвісках. Радіальна стійкість пучка в процесі групування забезпечується знакомінним електростатичним полем між сусідніми трубками дрейфу. Ефект фокусування досягається за рахунок додаткової подачі на трубки дрейфу електростатичного потенціалу, що чергується.

Результаты численного моделирования различных вариантов банчера с суперпозицией ВЧ-группирующего и фокусирующего электростатического поля свидетельствуют, что токи лёгких ионов, которые можно ускорять начальной частью линейного ускорителя, могут составлять величину порядка 30...40 мА и более при энергии инжекции 70...100 кэВ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. И.М. Капчинский, В.А. Тепляков. Линейный ускоритель ионов с пространственно-однородной жесткой фокусировкой // *Приборы и техника эксперимента*. 1970, №2, с.19-21.
2. P.O. Demchenko, Ye.V. Gussev, M.G. Shulika. A channel of high current deuteron linac with low radiation losses // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Nuclear Physics Investigations»* (41). 2003, №2, p.138-143.
3. И.М. Капчинский. *Теория линейных резонансных ускорителей. Динамика частиц*. М.: «Энергоиздат», 1982, 240 с.
4. P.O. Demchenko, Ye.V. Gussev, A.G. Lyamar, et al. A Neutron Source on a Basis of a Subcritical Assembly Driven by a Deuteron Linac // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Nuclear Physics Investigations»* (46). 2006, №2, p.31-33.
5. В.А. Воронко, Е.В. Гусев, П.А. Демченко, В.В. Сотников, Н.Г. Шулика, О.Н. Шулика. Численное моделирование динамики частиц в канале линейного резонансного ускорителя дейтронов на энергию 23 МэВ // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*(49). 2008, №3, с. 86-90.
6. В.А. Воронко, Е.В. Гусев, П.А. Демченко, А.Г. Лымарь, В.В. Сотников, Н.Г. Шулика, О.Н. Шулика. Линейный дейтронный ускоритель непрерывного действия // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»* (50). 2008, №5, с.28-32.

*Статья поступила в редакцию 14.05.2008 г.*