

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ В КАНАЛЕ ЛИНЕЙНОГО РЕЗОНАНСНОГО УСКОРИТЕЛЯ ДЕЙТРОНОВ НА ЭНЕРГИЮ 23 МэВ

*В.А. Воронко, Е.В. Гусев, П.А. Демченко, В.В. Сотников, Н.Г. Шулика, О.Н. Шулика*  
Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»  
Харьков, Украина

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

Приведены результаты численного моделирования динамики частиц в канале многосекционного линейного резонансного ускорителя дейтронов на энергию 23 МэВ и ток 10 мА, рассчитанного на непрерывный режим работы. Использование группирователя с электростатической фокусировкой позволяет обеспечить коэффициент захвата не менее 70%. Показано, что сочетанием переменного-фазовой и магнитной фокусировок можно существенно снизить уровень активации ускорителя.

## ВВЕДЕНИЕ

При разработке в ННЦ ХФТИ концептуального проекта электроядерного нейтронного источника рассматривалось несколько вариантов ускорителей-драйверов для генерации первичных нейтронов [1]. Один из вариантов представлял собой линейный дейтронный ускоритель непрерывного действия с выходной энергией 23 МэВ, током 3 мА и средней мощностью пучка 69 кВт. При использовании бериллиевой мишени скорость генерации первичных быстрых нейтронов в случае дейтронного пучка составляет  $\sim 6 \cdot 10^{14}$  н/с.

В дальнейшем была выполнена оптимизация ускоряющего канала, которая преследовала несколько целей. Во-первых, увеличение выходного тока до 10 мА, при заданной энергии дейтронов 23 МэВ, и соответственно мощности пучка до 230 кВт. Для уменьшения вероятности высоковольтных пробоев в инжекторе была снижена энергия инжекции с 100 до 72,5 кэВ. Во-вторых, особое внимание было уделено минимизации потерь тока дейтронов в ускоряющих секциях, где эти потери могут приводить к значительной активации конструкции ускорителя. В настоящем сообщении рассмотрены принцип построения ускоряющего канала дейтронного линака непрерывного действия и результаты численного моделирования динамики пучка в этом канале.

## 1. УСКОРЯЮЩИЙ КАНАЛ

При построении линейных ускорителей ионов существенным является выбор типа резонансной структуры ускоряющих секций и способа обеспечения в них устойчивой динамики пучка заряженных частиц. Так как энергия дейтронов не превышает  $W \leq 23$  МэВ, то для данного диапазона приведенных скоростей  $\beta = v/c \leq 0,156$  наиболее эффективными являются ускоряющие структуры на основе  $H$ -резонаторов, нагруженных трубками дрейфа ( $v, c$  - скорости частицы и света соответственно). В рассматриваемой области значений  $\beta$   $H$ -резонаторы имеют высокое удельное шунтовое сопротивление ( $R_{sh} \geq 50$  МОм/м) и минимальные поперечные размеры при выбранной рабочей частоте ( $f = 152$  МГц).

На Рис.1 приведена типичная конструкция исследованных в ННЦ ХФТИ ускоряющих секций на основе цилиндрического  $H$ -резонатора. Трубки дрейфа 3 поочередно закреплены в держателях 2 типа "гребёнка", разность потенциалов между которыми формирует  $\pi$ -волну электрического поля вдоль оси резонатора с длиной ускоряющего периода  $\beta\lambda/2$  ( $\lambda$ -длина волны электромагнитного поля).

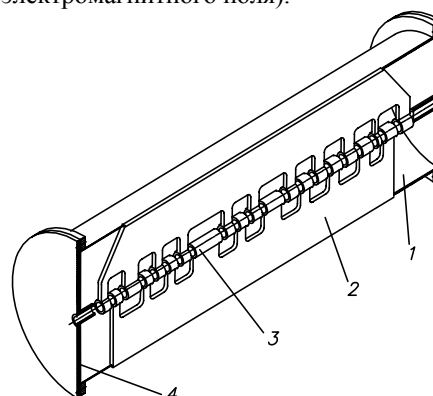


Рис. 1. Ускоряющая секция на основе  $H$ -резонатора: 1- обечайка резонатора, 2- гребенчатый держатель, 3- трубка дрейфа, 4- днище резонатора

В настоящей разработке устойчивая динамика пучка частиц в пределах каждой ускоряющей секции достигалась использованием переменного-фазовой фокусировки (ПФФ). Этот принцип обеспечения устойчивости как поперечного, так и продольного движений одним и тем же высокочастотным полем в течение ряда лет исследовался в ННЦ ХФТИ. На его основе создано несколько действующих образцов ускорителей [2,3].

Основная трудность построения канала ПФФ состоит в выборе, из множества возможных вариантов, такого распределения знака и значений фазы  $\phi$ , синхронной частицы вдоль ускоряющих периодов секции, при котором достигаются максимальный коэффициент захвата пучка, наибольшие ток и темп ускорения. Задача усложняется существенной нелинейностью динамики частиц, что требует оптимизации каждого ускоряющего периода (длины и апертуры трубок дрейфа, величины зазоров, напряжённости электрического поля).

На основании многолетнего опыта численного моделирования динамики пучков ионов в каналах ПФФ были определены основные особенности его построения. На Рис.2 представлено распределение значений фазы синхронной частицы  $\varphi_s$  вдоль ускоряющих периодов первой секции дейтронного ускорителя с выходной энергией 1,2 МэВ. На входе секции расположены группирователь и согласующее устройство специальной конструкции. Величина тока инжекции составляет 15 мА, энергия дейтронов  $W_0=72,5$  кэВ.

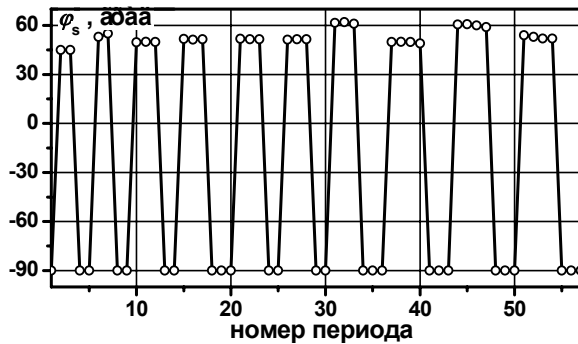


Рис.2. Зависимость синхронной фазы от номера ускоряющего периода

Как следует из Рис.2, ускоряющие периоды, в которых имеет место фокусировка ( $\varphi_s > 0$ ), совместно с периодами, где происходит фазировка ( $\varphi_s < 0$ ), образуют последовательно чередующиеся группы. Причём среднее число периодов на участках фокусировки превышает число периодов на участках фазировки. Два смежных участка, включающие фазировочные и фокусирующие ускоряющие периоды, формируют один период ПФФ-фокусировки. Следовательно, 57 ускоряющих периодов первой секции (см. Рис.2) образуют 10 периодов ПФФ-фокусировки. Т.к. в фазировочных периодах значение синхронной фазы  $\varphi_s \approx -90^\circ$ , то основное ускорение частиц происходит на участках фокусировки ( $\varphi_s = 45^\circ \dots 60^\circ$ ).

Первые и последние ускоряющие периоды каждой секции являются фазировочными, что сделано для более эффективного согласования параметров пучка на переходах между секциями.

Необходимое для устойчивой динамики пучка распределение фазы синхронной частицы (см.Рис.2) достигается соответствующей вариацией длин трубок дрейфа.

Рассмотренный подход к построению ускоряющих секций ионных ускорителей получил название модифицированной переменного-фазовой фокусировки (МПФФ).

Для иллюстрации влияния на характер движения частиц высокочастотной МПФФ-фокусировки, на Рис.3 приведены огибающие пучка для 90%, 95% и 98% тока пучка, вошедшего в первую секцию. На Рис.4 приведены поперечный и продольный фазовые портреты пучка на выходе этой секции.

Среднеквадратичный разброс по энергиям составляет  $(\Delta W/W)_{rms} \approx 1,16\%$ , а фазовая протяженность формируемых сгустков на уровне 0,1 амплитуды тока, равна  $\Delta\varphi \approx 40^\circ$ . Коэффициент захвата частиц в режим ускорения 72%.

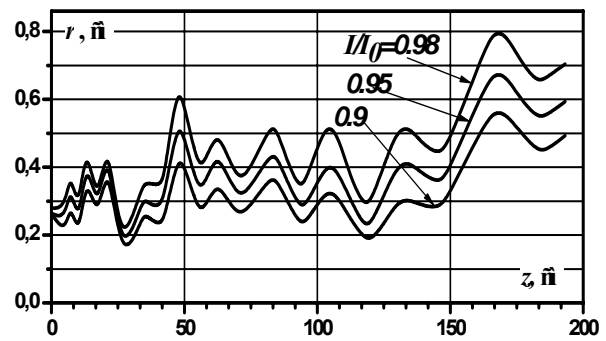


Рис.3. Огибающие пучка в первой ускоряющей секции

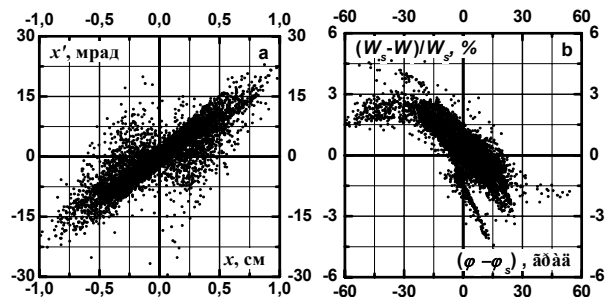


Рис.4. Поперечный (а) и продольный (б) фазовые портреты пучка на выходе первой секции

Начальная часть ускорителя является наиболее сложной для расчёта. При построении последующих секций использован аналогичный подход. Различие состоит в существенном уменьшении числа периодов фокусировки (не более двух). В этих секциях, по мере затухания продольных и поперечных колебаний частиц, значения синхронной фазы по модулю в среднем уменьшаются как в фазировочных ( $\varphi_s \approx -60^\circ \dots -70^\circ$ ), так и в фокусирующих ( $\varphi_s \approx 43^\circ \dots 46^\circ$ ) ускоряющих периодах. Это позволяет увеличить темп ускорения.

При расчёте ускоряющего канала большое значение для минимизации потерь частиц имеет способ согласования характеристик пучка как в поперечной, так и в продольной фазовых плоскостях, при переходах между соседними секциями.

Для согласования поперечных характеристик фазового объёма пучка на участках переходов между секциями использовались магнитные линзы. Согласование продольных характеристик достигалось подбором длин участков.

В качестве фокусирующих устройств рассматривались магнитные квадрупольные триплеты и сверхпроводящие соленоиды.

Для иллюстрации на Рис.5,6 приведена трансформация фазового объёма пучка на переходах между соседними секциями №10 и №11 (энергия дейтронов 15,74 МэВ). На Рис.5 показаны проекции фазового объёма пучка на поперечные ( $x-x'$ ), ( $y-y'$ ) и продольную ( $\varphi, W$ ) плоскости на выходе секции №10. На Рис.6 представлены эти же фазовые характеристики пучка после прохождения согласующего участка между секциями, на котором соответственно установлен или магнитный квадрупольный триплет, или фокусирующий соленоид.

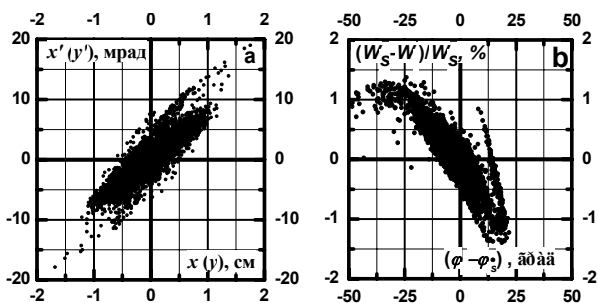


Рис. 5. Проекция фазового объёма пучка на выходе секции №10: **a** – на плоскости  $(xx')$  и  $(yy')$ , **b** – на продольную плоскость

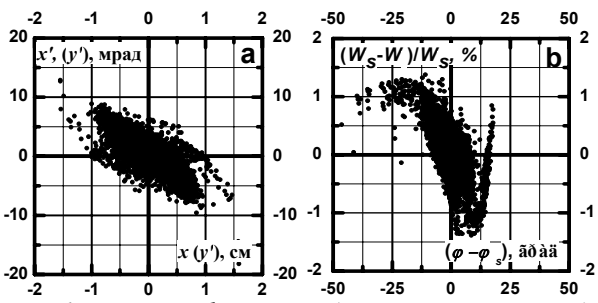


Рис. 6. Проекция фазового объёма пучка после квадрупольного триплета или соленоида: **a** – на плоскости  $(xx')$  и  $(yy')$ , **b** – на продольную плоскость

Как следует из приведенных рисунков, для обоих типов линз на входе последующей секции можно получить идентичную форму фазового объёма пучка, требуемую для оптимального согласования. Для рассмотренного участка перехода в таблице 1 приведены сравнительные параметры обоих типов магнитных линз, где  $L$  – длина линзы,  $L_{eff}$  – эффективная длина,  $r_a$  – радиус апертуры,  $B$  – магнитная индукция (для триплета указана на полюсах).

Таблица. 1

Линза	$L$ , см	$L_{eff}$ , см	$r_a$ , см	$B$ , Тл
Соленоид	10	80	3.2	5.2
Триплет	92	112	3.8	0.45

Проведенный анализ показывает, что в случае использования в ускоряющем канале аксиально-симметричных линз, для получения требуемых напряжённостей магнитного поля необходимо использовать сверхпроводящие соленоиды. В то время как изготовление триплетов с требуемыми техническими характеристиками не представляет проблем.

Применение сверхпроводящих соленоидов в ускоряюще-фокусирующем канале может оказаться целесообразным в случае использования сверхпроводящих ускоряющих структур, которые наиболее эффективны в ускорителях непрерывного режима работы.

Рассмотренный подход, основанный на комбинации переменного-фазовой фокусировки в ускоряющих секциях и магнитной фокусировки на участках переходов между ними, последовательно проводился при численном моделировании ускоряющего канала.

В таблице 2 приведены основные характеристики рассчитанных секций дейтронного ускорителя непрерывного режима работы.

## 2. НАЧАЛЬНАЯ ЧАСТЬ УСКОРИТЕЛЯ

В данной разработке, учитывая сравнительно умеренные значения тока пучка, рассматривается вариант начальной части, состоящей из конструктивно автономных устройств: группирователя (банчера), согласующего устройства (согласователя) и первой ускоряющей секции с МПФФ-фокусировкой. Структура канала первой секции и динамика пучка в ней рассмотрены выше.

Конструкции группирователя и согласователя, которые располагались на входе первой секции, представлены на Рис.7.

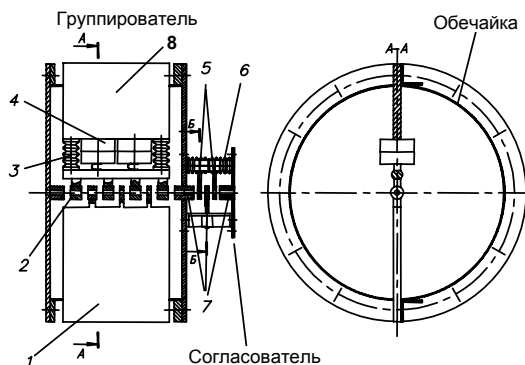


Рис. 7. Группирователь-согласователь: 1-гребенчатый держатель; 2-трубки дрейфа; 3-изоляторы, 4-конденсаторы связи; 5-потенциальные электроды; 6-изолятор; 7-заземленные электроды

Группирователь представляет собой короткий  $H$ -резонатор, нагруженный трубками дрейфа и настроенный на рабочую частоту 152 МГц. Основная проблема при расчете группирователя состоит в обеспечении радиальной устойчивости пучка при его транспортировке в группирователе.

Так как энергия инжекции дейтронов составляла  $W_0=72,5$  кэВ, то для фокусировки пучка в группирователе было предложено использовать электростатическое поле с чередованием потенциала между трубками дрейфа. Для этого на чётные трубки дрейфа 2 (см. Рис.7) подавалось отрицательное напряжение смещения относительно резонатора. Эта группа трубок была изолирована от держателя 8 изоляторами 3. Высокочастотная связь с резонатором осуществлялась через разделительную ёмкость 4. Таким образом, на чётных трубках дрейфа кроме высокочастотной составляющей поля имелось и постоянное смещение, которое обеспечивало фокусировку пучка. На нечётных трубках дрейфа имелась только высокочастотная составляющая поля.

Оптимальные условия для группировки и транспортировки пучка достигались при потенциале смещения  $-50$  кВ и высокочастотной разности потенциалов между трубками дрейфа  $5,2$  кВ.

Для оптимального захвата частиц в режим ускорения первой секцией на её входе необходимо иметь сходящийся по радиусу пучок определённого диаметра. Соответствующее согласование поперечных фазовых характеристик пучка с аксептансом секции достигается с помощью согласователя (см Рис.7). Он представляет собой многоэлектродную аксиаль-

Таблица 2. Основные характеристики ускоряющих секций

№ секции	Энергия пучка, МэВ		Эмиттанс, мм×мрад.		Число периодов ускорения	Число периодов фокусировки	Длина секции, м	Средняя на-пряженность эл. поля в зазорах, кВ/см	Ток, мА		Мощность воз-буждения, кВт
	входная	выходная	на входе	на выходе					на входе	на выходе	
1	0,0725	1,29	0,15	2,06	57	10	1,93	120	15,0	11,1	43
2	1,29	2,38	2,06	2,35	21	2	1,25	94	11,1	11,0	60
3	2,38	3,88	2,35	2,78	25	2	1,75	63	11,0	10,9	80
4	3,88	5,12	2,78	2,78	17	1	1,4	60	10,9	10,9	70
5	5,12	6,35	2,78	2,76	17	1	1,58	60	10,9	10,9	90
6	6,35	7,8	2,76	3,1	16	1	1,65	57,6	10,9	10,9	110
7	7,8	9,46	3,1	3,15	15	1	1,71	60	10,9	10,9	140
8	9,46	11,46	3,15	3,49	18	1	2,18	57	10,9	10,9	130
9	11,46	13,53	3,49	3,63	17	1	2,25	57,4	10,9	10,9	150
10	13,53	15,74	3,63	3,65	18	1	2,54	51,7	10,9	10,9	170
11	15,74	18,02	3,65	3,92	18	1	2,71	47,7	10,9	10,9	160
12	18,02	20,55	3,92	4,08	18	1	2,89	45,7	10,9	10,9	175
13	20,55	23,0	4,08	4,13	20	1	3,35	45,7	10,9	10,9	180
<b>Итого</b>							<b>27,19</b>				<b>1558</b>

но-симметричную линзу с чередующимся потенциа-лом на электродах. Максимальный коэффициент захвата начальной частью ускорителя наблюдается при потенциале -41 кВ на электродах 5, относительно заземлённых электродов 7.

Для нескольких значений доли полного тока инжекции на Рис. 8 приведены поведения огибающих пучка на участках группирователя и согласователя. На рисунке они разделены пунктирной линией.

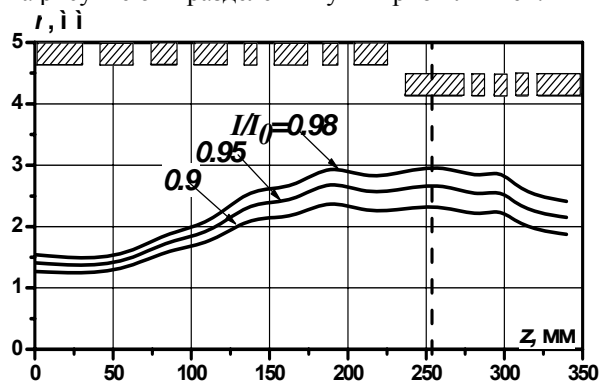


Рис.8. Огибающие пучка в группирователе-согласователе

Результаты численного моделирования показывают, что приведенный подход к построению группирователя-согласователя позволяет в достаточно широких пределах осуществлять трансформацию фазового объема пучка с целью получения максимального коэффициента захвата частиц начальной частью ускорителя.

### 3. ПОТЕРИ ПУЧКА И АКТИВАЦИЯ УСКОРИТЕЛЯ

Возможность обслуживания ускорителя определяется допустимым уровнем мощности дозы  $K_a$  ионизирующего излучения вблизи ускорителя после его выключения, при условии длительной предварительной работы (время активации). Образующееся

радиационное поле обусловлено активацией материала элементов ускоряющего канала в результате ядерных реакций, инициируемых дейтронами при их потере. Для снижения уровня активации, необходимо уменьшать потери тока пучка вдоль канала по мере роста энергии дейтронов.

При численном моделировании ускоряющего канала принимались специальные меры для того, чтобы основные потери частиц происходили в низкоэнергетических секциях, так как с ростом энергии дейтронов быстро увеличиваются число каналов ядерных реакций, приводящих к образованию радионуклидов, и скорости их выхода. Для уменьшения потерь была увеличена жёсткость переменнo-фазовой фокусировки за счёт увеличения в среднем модуля синхронной фазы, что, в свою очередь, приводит к снижению темпа ускорения.

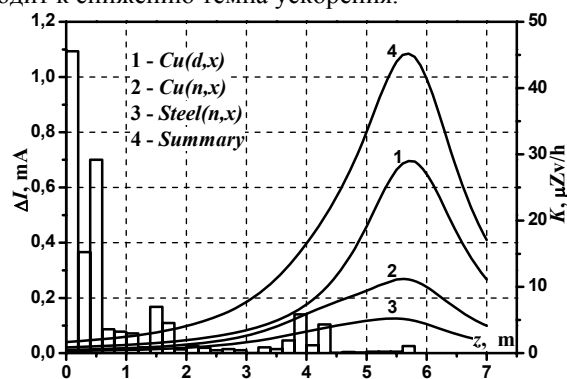


Рис.9. Распределения вдоль ускорителя: потерь тока  $\Delta I$  дейтронов (гистограмма) и мощностей дозы  $K$  (кривые 1-4), обусловленных различными механизмами активации

На гистограмме (Рис.9) представлено распределение тока потерь дейтронов  $\Delta I$  вдоль участка канала с конечной энергией ~4 МэВ ( $z$ -продольная координата). Здесь же (кривые 1...4) приведены распределения мощности дозы  $K$  вдоль канала на расстоянии 1 м от его оси через 1 час после выключения

пучка. Время активации  $t_a > 1$  месяца. Кривые 1-3 Рис.9 представляют парциальный вклад в суммарную мощность дозы (кривая 4) различных механизмов активации ускорителя. В частности, активации медных трубок дрейфа непосредственно бомбардировкой дейтронами  $Cu(d,x)$  (1), их активации вторичными нейтронами  $Cu(n,x)$ , образующимися в реакциях  $Cu(d,xn)$  (2), и активации вторичными нейтронами вакуумного лайнера из нержавеющей стали (3), в котором расположены ускоряющие секции.

В соответствии с нормами радиационной безопасности Украины (НРБУ-97) допустимая мощность дозы для персонала составляет  $K_a = 12$  мкЗв/ч при равномерном облучении в течение года. Как следует из Рис.9, в критической точке величина  $K_a$  превышает приблизительно в 4 раза. Таким образом, через 1 час после выключения пучка время пребывания персонала вблизи ускорителя не должно превышать 2 часа, либо следует увеличить время радиационного остывания  $t_c > 2$  часов. Спустя 24 часа мощность дозы на рассмотренном участке ускорителя не превышает  $K_a$ , вследствие распада относительно короткоживущих радионуклидов.

На остальном участке рассчитанного канала ( $z > 6$  м) длиной около 22 м моделирование динамики пучка методом макрочастиц не даёт потерь дейтронов. Так как в моделирующем ансамбле использовалось  $10^4$  частиц, то это даёт верхнюю оценку потерям тока пучка  $\Delta I/I_0 < 10^{-4}$  или, соответственно, значение  $\Delta I < 1,5$  мкА. Для среднего значения линейных потерь на этом участке имеем верхнюю оценку  $dI/dz < 70$  нА/м.

Для радиационно-чистого ускорителя оценки максимально допустимого уровня линейных потерь

дают значение не более  $20 \dots 10$  нА/м, при энергиях дейтронов в интервале  $14 < W < 23$  МэВ.

Таким образом, для более точной оценки в целом активации ускоряющего канала необходимо увеличить число макрочастиц в ансамбле как минимум на порядок величины.

## ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований показывают, что на основе развитого в ННЦ ХФТИ метода модифицированной переменного-фазовой фокусировки могут быть реализованы каналы линейных ионных ускорителей средних энергий с низким уровнем радиационных потерь и относительно простой конструкцией ускоряющих секций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Ukraine-USA Meeting "Accelerator Driven Subcritical Assembly Facility"*. Україна, Харків, 24-25 лютого 2005 / Під ред. А.М. Довбні ННЦ ХФТИ, Харків, 2005. 246 с.
2. Е.В. Гусев, С.Ю. Кривуля, Н.Г. Шулика и др. Исследование ускоряющей структуры ускорителя дейтронов МЛУД-3 // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»* (5). 1989, №.5, с.37-39.
3. П.А. Демченко, И.К. Ковальчук, В.В. Митроченко и др. Экспериментальные исследования динамики протонов в ускорителе с переменного-фазовой фокусировкой // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Техника физического эксперимента»* (24). 1985, №.3, с.28-31.

## PARTICLE DYNAMICS SIMULATION IN A 23 MeV RESONANT DEUTERON LINAC

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

The paper presents numerical simulation results of particle dynamics in an accelerating channel of a multi-section resonant deuteron linac (energy 23 MeV, current 10 mA) operated in a continuous mode. The transport ratio may be achieved more than 70%, if a buncher with an electrostatic focusing is used. Accelerator activation may be decreased considerably using combination of alternating phase focusing and magnetic focusing.

## ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ЧАСТИНОК У КАНАЛІ ЛІНІЙНОГО РЕЗОНАНСНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ДЕЙТРОНІВ З ЕНЕРГІЄЮ 23 МєВ

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

Надано результати чисельного моделювання динаміки частинок у каналі багатосекційного лінійного прискорювача дейтронів з енергією 23 МєВ та струмом 10 мА, що має працювати у безперервному режимі. Використання банчера з електростатичним фокусуванням дає можливість мати коефіцієнт захоплення частинок не менше 70%. Показано, що поєднання змінно-фазового та магнітного фокусування дозволяє значно зменшити рівень активації прискорювача.