

ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ДЕЙТРОНОВ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА

С.А. Вдовин, Е.В. Гусев, П.А. Демченко, Н.Г. Шулика

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

E-mail: gussev@kipt.kharkov.ua

Представлены основные характеристики и особенности построения линейного ускорителя дейтронов с энергией 3 МэВ для активационного анализа элементного состава материалов. Для получения нейтронов предполагается использовать бериллиевый конвертор. При среднем токе пучка ~200 мкА ожидаемый выход нейтронов составляет $\sim 4 \cdot 10^{11}$ н/с. Ускоритель представляет собой H -резонатор, нагруженный трубками дрейфа. Распределение потенциала на трубках дрейфа соответствует π -моду колебаний. Динамическая устойчивость пучка в процессе ускорения достигается за счёт использования модифицированной переменнo-фазовой фокусировки.

1. ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в области физики и техники линейных ускорителей ионов (увеличение среднего тока пучков, улучшение характеристик и технологии производства ускоряющих структур, уменьшение эксплуатационных расходов) способствует более широкому использованию в промышленности, медицине и других отраслях линейных ускорителей протонов и дейтронов относительно низких энергий ($W=1 \dots 10$ МэВ) [1].

Основными областями применения таких ускорителей являются:

- производство медицинских радиоизотопов, в частности, β -активных радионуклидов для позитронно-эмиссионной томографии в медицинской диагностике;
- создание источников нейтронов на основе ядерных реакций (d,n), (p,n) без использования делящихся материалов, которые являются безопасной альтернативой ядерным реакторам деления для целого ряда применений (нейтронно-активационный анализ элементного состава материалов, нейтрон-захватная терапия злокачественных опухолей, нейтронная радиография объектов);
- бесконтактный таможенный контроль грузов на наличие взрывчатых веществ или делящихся материалов.

Важное практическое применение, в частности, для определения элементного состава вещества методом нейтронно-активационного анализа (НАА), имеют тепловые нейтроны. Как правило, такие исследования проводятся на ядерных реакторах. Сущность НАА заключается в облучении исследуемого образца тепловыми нейтронами и последующем изучении характеристических γ -спектров, испускаемых активированными ядрами. Метод позволяет получать количественные данные, является неразрушающим, не изменяет состава и агрегатного состояния вещества. В настоящее время НАА является методом окончательного контроля, когда другие средства анализа дают противоречивые или спорные результаты.

Для получения нейтронов при энергии пучков ионов ниже 4,0 МэВ наиболее предпочтительной, с учётом физических свойств конверсионной мишени, является реакция ${}^9\text{Be}(d,n)$. На Рис.1 показаны выходы нейтронов в зависимости от энергии протонов и дейтронов при бомбардировке бериллиевой и литиевой мишеней. Выходы приведены к току пучка 1 мкА [2].

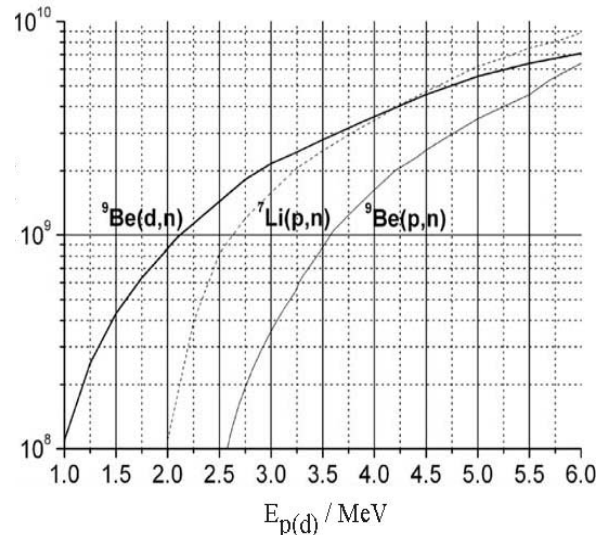


Рис.1. Выходы быстрых нейтронов из бериллиевой и литиевой мишеней [2]

В 70-х годах в ННЦ ХФТИ был разработан малогабаритный линейный ускоритель МЛУД-3 с энергией дейтронов 3 МэВ. Ускоритель эксплуатировался в течение ряда лет в НИИ неорганических материалов им. А.А. Бочвара (Москва) для элементного анализа материалов, используемых в атомной промышленности. Средний ток пучка дейтронов не превышал 1 мкА [3]. В ускорителе, для достижения радиальной устойчивости пучка в процессе резонансного ускорения, использовалась сеточная фокусировка, что существенно ограничивало ток дейтронов.

Пучки дейтронов МЛУД-3 применялись как для генерации нейтронов и последующего НАА [4], так и активационного анализа при непосредственном облучении образцов ускоренными дейтронами [5].

Аналитические исследования, проведенные с применением ускорителя *МЛУД-3*, показали возможность определения не менее 30 элементов с порядковыми номерами $Z \leq 30$ и чувствительностью не хуже ($10^{-1} \dots 10^{-3}$)%. Для лёгких элементов (*B, C, N, O, F, Al*) высокая чувствительность достигалась при непосредственном облучении образцов дейтронами.

Чувствительность обоих вариантов активационного анализа линейно увеличивается с ростом тока ионного пучка, что существенно для контроля следов элементов, в частности, в материалах микроэлектроники.

Работы по созданию линейных ускорителей протонов и дейтронов в качестве генераторов нейтронов для прикладных целей проводятся в ряде стран, в частности, США [6], Китае [7].

Фирма AccSys Technology (США) производит коммерческие линейные ускорители протонов и дейтронов низких энергий для прикладных целей серии *LANSAR™* [6,8]. Максимальная энергия линейных ускорителей дейтронов этого типа составляет $W=3,9$ МэВ, средний ток пучка $I=0,21$ мА (модель *DL-4*). При бериллиевом конверторе выход нейтронов составляет $Y_n=6 \cdot 10^{11}$ н/с. Для термализации генерируемых быстрых нейтронов используется замедлитель специальной конструкции, что позволяет получать потоки тепловых нейтронов с плотностью $\Phi_T \approx 1,9 \cdot 10^9$ н/см²·с.

В Китае [8] ведутся работы над созданием базового варианта линейного ускорителя с энергией дейтронов $W=2$ МэВ, средним током $I=5$ мА и планируемым выходом нейтронов $Y_n=4 \cdot 10^{12}$ н/с.

Приведенные выше значения потоков нейтронов достаточны для проведения элементного анализа и поиска следов элементов с достаточно высокой чувствительностью, а также для нейтронной радиографии.

Чувствительность *НАА* при определении количества элемента в образце зависит от многих факторов, в частности, от ядерных характеристик радионуклида, образующегося в результате ядерных реакций, и пропорциональна плотности потока нейтронов Φ_T .

Таблица 1

Чувствительность, г ($\Phi=10^9$ н/см ² ·с)	Элементы
10^{-8}	Dy, Eu
$10^{-8} \dots 10^{-7}$	In, Lu, Mn
$10^{-7} \dots 10^{-6}$	Au, Ho, Ir, Re, Sm, W
$10^{-6} \dots 10^{-5}$	Ag, Ar, As, Br, Cl, Co, Cs, Cu, Er, Ga, Hf, I, La, Sb, Sc, Se, Ta, Tb, Th, Tm, U, V, Yb
$10^{-5} \dots 10^{-4}$	Al, Ba, Cd, Ce, Cr, Hg, Kr, Gd, Ge, Mo, Na, Nd, Ni, Os, Pd, Rb, Rh, Ru, Sr, Te, Zn, Zr
$10^{-4} \dots 10^{-3}$	Bi, Ca, K, Mg, P, Pt, Si, Sn, Ti, Tl, Xe, Y
$10^{-3} \dots 10^{-2}$	F, Fe, Nb, Ne
10^{-1}	Pb, S

В Табл. 1 приведены минимальные количества химических элементов в образце, которые могут быть измерены при облучении потоком тепловых нейтронов $\Phi_T=10^9$ н/см²·с. Это значение потока близко к величинам, которые можно получать на источниках нейтронов, генерируемых современными линейными ускорителями протонов и дейтронов низких энергий.

В настоящее время почти все линейные ускорители ионов, разрабатываемые для генерации нейтронов, используют ускоряющие секции с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой пучка (*ПОКФ*), или *ПОКФ* с последующей секцией с трубками дрейфа.

В *ННЦ ХФТИ* в течение ряда лет ведутся работы по разработке линейных ускорителей протонов и дейтронов с использованием альтернативного подхода к обеспечению динамической устойчивости пучка, а именно, с помощью одного из вариантов переменного-фазовой фокусировки (*МПФФ*) [9].

В настоящей работе приведены основные характеристики и особенности конструкции линейного ускорителя дейтронов с энергией 3 МэВ и средним током пучка 0,2 мА, который предлагается использовать в качестве генератора нейтронов для *НАА*. Устойчивость динамики пучка в ускорителе достигается использованием *МПФФ*. Ожидаемый выход нейтронов Y_n с бериллиевой мишени составляет $Y_n \approx 4 \cdot 10^{11}$ н/с.

2. КОНСТРУКЦИЯ УСКОРИТЕЛЯ

При разработке ускорителя в качестве прототипа был выбран вариант малогабаритного ускорителя дейтронов *МЛУД-3* на энергию частиц 3 МэВ, в котором была реализована ускоряющая структура с *МПФФ*. Этот ускоритель являлся альтернативой более раннему варианту с сеточной фокусировкой.

Ускоритель позволил экспериментально исследовать особенности динамики ионов в системах с высокочастотной переменного-фазовой фокусировкой и перспективы улучшения характеристик пучков, в частности, увеличения тока ускоренных частиц [10]. Опыт его эксплуатации и апробирование технических решений был использован в процессе разработки конструкции предлагаемого ускорителя для *НАА*.

Основные характеристики этого ускорителя дейтронов представлены в Табл.2, а его структурная схема приведена на Рис.2.

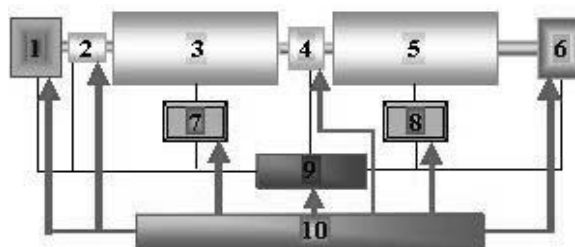


Рис.2. Блок-схема ускорителя

Ускоритель включает: инжектор дейтронов (1); устройство (2) для согласования поперечного фазового объема инжектируемого пучка с аксептансом

ускорителя; ускоряюще-фокусирующий канал, состоящий из двух резонансных ускоряющих секций (3, 5) и расположенного между ними фокусирующего магнитного квадрупольного триплета (4); устройство (6) для конверсии и термализации нейтронов; источники ВЧ-питания (7,8); устройство силового питания (9); устройство управления и контроля (10).

Таблица 2

Энергия инъекции, кВ	135
Выходная энергия дейтронов, МэВ	3,1
Рабочая частота, МГц	100
Импульсный ток пучка, мА	50
Средний ток пучка, мкА	~200
Коэффициент захвата, %	50
Нормализованный эмиттанс (RMS), см·мрад	1,2
Средняя мощность пучка, Вт	~600
Длительность посылки, мкс	200
Частота посылок, Гц	20
Заполнение посылки, %	0,4
Число резонаторов	2
Длины резонаторов, м	1,4+1,3
Диаметр резонаторов, м	0,5
Импульсная ВЧ-мощность, кВт	850
Средняя ВЧ-мощность, кВт	3,4
Максимальная напряжённость ВЧ-поля в зазорах, кВ/см	118 90
Добротности резонаторов	14340
	12460

Инжектор (1) (см. Рис.2) с выходной энергией дейтронов 135 кэВ и импульсным током не менее 100 мА состоит из дуоплазматрона с холодным полым катодом и трёхэлектродной системы формирования пучка.

Согласующее устройство (2) представляет собой четырёхэлектродную электростатическую линзу со знакопеременным распределением потенциала $\pm U$ ($|U| \leq 75$ кВ). В дальнейшем, для увеличения коэффициента захвата пучка в режим ускорения, предполагается использовать согласующее устройство с суперпозицией электростатического (или постоянного магнитного) и высокочастотного полей. Конструкция такого устройства, обеспечивающего как фокусировку, так и предварительную группировку пучка, приведена в работе [11].

Ускоряющий канал образован двумя цилиндрическими H -резонаторами с трубками дрейфа, расположенными в отдельных вакуумных объемах (3,5), (см. Рис.2).

В резонаторах возбуждается H -мода колебаний, а распределение напряжённости электрического поля вдоль оси структуры соответствует π -волне.

Динамическая устойчивость пучка в ускоряющих секциях (3,5) (см. Рис.2), достигается использованием модифицированной переменного-фазовой фокусировки. Требуемые распределения значений синхронной фазы вдоль ускоряющих периодов определяются соответствующей вариацией длин трубок дрейфа.

В первом резонаторе (Рис.3) трубки дрейфа располагаются на двух парах держателей типа «гребёнок» и образуют 22 ускоряющих периода. Такое разбиение ускоряющей структуры позволяет получить оптимальное распределение напряжённости электрического поля вдоль оси системы, по мере роста величины ускоряющих зазоров, без существенного снижения электродинамических характеристик и электрической прочности канала. Разность потенциалов на второй паре гребёнок в 1,8 раза выше напряжения первой.

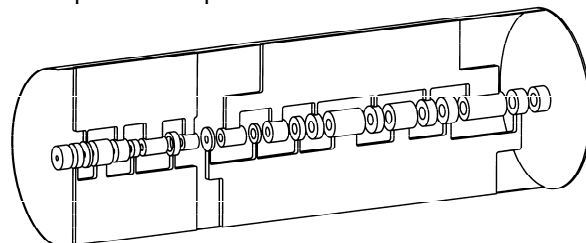


Рис.3. Первая секция ускорителя

Распределение значений синхронной фазы вдоль ускоряющих периодов первой секции образует 5 периодов радиальной фокусировки и рассчитано так, чтобы обеспечить максимальный захват тока инжектируемого пучка (50%) в процесс ускорения, при приемлемом темпе ускорения $\sim 1,2$ МэВ/м.

На выходе первой секции формируется пучок с фазовыми характеристиками, которые требуют дополнительного согласования с аксептансом и сепаратрисой последующей секции.

Вторая секция (Рис.4) включает 13 ускоряющих периодов, которые формируют три неполных периода фокусировки. Трубки дрейфа этой секции располагаются на одной паре гребёноччатых держателей. Структура обеспечивает ускорение пучка до выходной энергии практически без потерь.

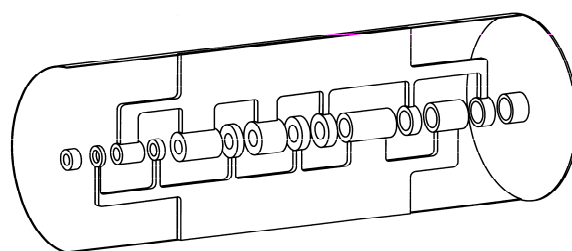


Рис.4. Вторая секция ускорителя

Энергии дейтронов на выходе секций соответственно 1,7 и 3,1 МэВ.

Для компенсации расстройки собственной частоты резонаторов относительно рабочего значения в них размещено по 2 настройщика специальной конструкции. Установка двух настройщиков позволяет минимизировать возмущения в распределении напряжённости электрического поля вдоль ускоряющего канала при подстройке частоты.

Охлаждение ускоряющих структур осуществляется проточной водой.

Высокочастотное питание резонаторов (7,8) (см. Рис.2) осуществляется от двух источников с импульсной мощностью до 600 кВт каждый.

Источник высокочастотного питания первой ускоряющей секции образован мощным усилительным каналом (VK1). Возбуждение канала на рабочей час-

тоте обеспечивается за счет положительной обратной связи (ПОС) с возбуждаемым резонатором [12].

Питание второй ускоряющей секции обеспечивается аналогичным УК1 усилительным каналом, на вход которого подается сигнал возбуждения от резонатора первой секции. Это обеспечивает равенство частоты и синхронизацию фаз ВЧ-колебаний, возбуждаемых в резонаторах.

Для стабилизации уровня ВЧ-поля в резонаторах, каждый усилительный канал охвачен цепью отрицательной обратной связи (ООС) с возбуждаемым резонатором. Сигнал ООС подается на плечо моста сложения, подключенного к входу УК. На второе плечо моста подается опорный сигнал с усилителя ограничителя, включенного в цепь ПОС. Регулировка уровня ВЧ-поля в резонаторах осуществляется изменением величины опорного сигнала.

Контроль величины тока и положения пучка в ускоряющем канале обеспечивается индукционными датчиками.

Рабочее давление в ускоряющем канале, не выше 1×10^{-6} мм.рт.ст., обеспечивается системой дифференциальной вакуумной откачки инжектора и резонаторов ускорителя.

Управление осуществляется с пульта (10), который включает блоки управления системами ускорителя и таймерное устройство, обеспечивающее синхронизацию работы систем. Силовая стойка (9), содержит пускорегулирующую аппаратуру.

В качестве конвертора нейтронов предполагается использовать бериллиевую мишень, охлаждаемую проточной водой. Рассматривается 2 варианта замедлителя эмитируемых нейтронов: обычная деионизированная вода H_2O , используемая для охлаждения мишени и тяжёлая вода D_2O , которая одновременно служит и теплоносителем.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ УСКОРЕННОГО ПУЧКА

Основные физические и инженерно-конструкторские параметры ускоряющего канала, а также характеристики пучка ускоренных дейтронов были получены методом последовательных приближений при численном моделировании динамики пучка и электродинамических характеристик резонансной ускоряющей структуры.

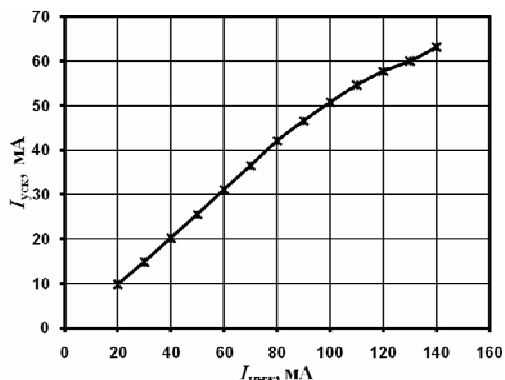


Рис. 5. Зависимость тока пучка ускоренных дейтронов от тока инжекции

На Рис. 5 приведена зависимость тока ускоренных дейтронов на выходе ускорителя от тока ин-

жекции $I_{ин}$. Как следует из приведенной зависимости, коэффициент захвата частиц K_c в режим ускорения приблизительно постоянный до значений тока инжекции $I_{ин} \approx 100$ мА и равен $K_c \approx 50\%$. В дальнейшем, с ростом тока инжекции K_c уменьшается, что обусловлено влиянием объемного заряда пучка.

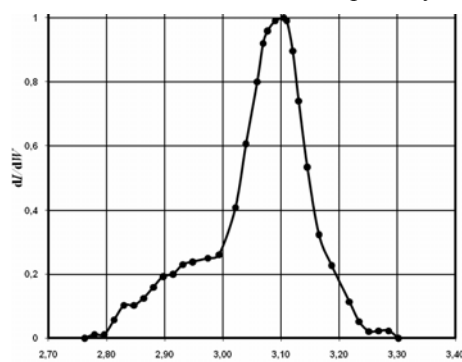


Рис. 6. Энергетический спектр пучка на выходе ускорителя

Энергетический спектр пучка ускоренных дейтронов приведен на Рис. 6. Наиболее вероятная энергия дейтронов 3,1 МэВ, среднеквадратичный разброс частиц по энергии составляет 0,2%.

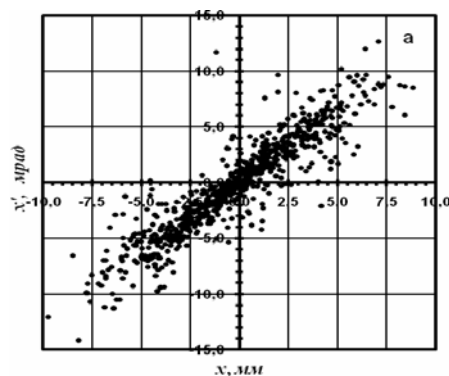


Рис. 7. Поперечный фазовый портрет пучка на выходе ускорителя

Важной характеристикой пучка, определяющей особенности его транспортировки и формирования зоны облучения конверсионной мишени, с требуемыми размерами и плотностью тока, является поперечный фазовый портрет. На Рис. 7 представлено распределение плотности макрочастиц в поперечном сечении фазового объема пучка на выходе второй ускоряющей секции. Моделирование динамики пучка проводилось методом макрочастиц. Таким образом, на выходе ускорителя пучок является расходящимся с характерным радиусом 7,5 мм и нормализованным среднеквадратичным эмиттансом $\epsilon_n = 1,2$ см-мрад.

Так как ускоряющий канал дейтронного ускорителя является двухсекционным, то для максимального захвата частиц второй секцией необходимо выполнить соответствующее согласование фазовых характеристик пучка, ускоренного первой секцией. В частности, на входе второй секции необходимо иметь сходящийся пучок с радиусом ~ 7 мм. Необходимая трансформация поперечного сечения фазового объема осуществляется фокусирующим магнитным квадрупольным триплетом 4 (см. Рис. 2).

Общая длина триплета составляет 40 см, радиус апертуры канала 2,5 см, градиент магнитной индукции 1,16 кГс/см.

Полная длина участка дрейфа между ускоряющими секциями 50 см выбрана таким образом, чтобы после дрейфа продольное сечение фазового объема пучка находилось в пределах сепаратрисы второй секции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы по созданию в ННЦ ХФТИ ускорителя дейтронов для НАА проводятся в рамках Государственной целевой программы Украины по использованию ядерных материалов и радиационных технологий. На первом этапе предусматривается разработка ускорителя, создание действующего макета и достижение проектных параметров дейтронного пучка.

Экспериментальное подтверждение выбранной физической концепции и принятых инженерно-конструкторских решений будут являться основанием для дальнейшей разработки: конвертора нейтронов, устройств для подачи исследуемых образцов в зону облучения, инструментального аппаратного комплекса для гамма-спектрометрии облученных мишеней и интерпретации полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. George H. Gillespie, Gerald E. McMichael. Applications of MeV Proton and Deuteron Linear Accelerators // *Proc. of the 1995 PAC, Dallas, Texas, USA*. 1995, p.107-109.
2. M.R. Hawkesworth. Neutron radiography: Equipment and Methods / *Atomic Energy Rev.* 15 (2). 1977, p.169-200.
3. Л.Н. Баранов, Н.А. Хижняк и др. Малогабаритный линейный ускоритель дейтронов на энергию 3 МэВ // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Физика высоких энергий и атомного ядра»*, 1975, 1 (13), с.15.
4. Ю.И. Бондаренко, А.Б. Медведев, В.С. Руденко. Применение малогабаритного ускорителя дейтронов на энергию 3 МэВ в нейтронно-

- активационном анализе // *Атомная Энергия*. 1981, т.51, в.1, с.67-68.
5. Ю.И. Бондаренко, А.Б. Медведев, В.С. Руденко. Использование дейтронов с энергией 3 МэВ в активационном анализе // *Атомная Энергия*. т.52, вып.3, с.189-190, 1981.
 6. R.W. Hamm. Status of the LANSAR™ Neutron Generators // *Reprint of the presentation given at the 5th World Conference on Neutron Radiography, June 17-20, 1996, Berlin, Germany*. p.10.
 7. C. Zhang, Z.Y. Guo, A. Schempp, J.E. Chen, J.X. Fang. Design of a high current RFQ for neutron production / *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 521*. 2004, p.326-331.
 8. R.W. Hamm and M.E. Hamm. How to create a Business out of manufacturing Linacs // *Proc. of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland*. 2006, p.1911-1915.
 9. Е.В. Гусев. Малогабаритные линейные ускорители ионов на *H*-резонаторах с модифицированной переменнo-фазовой фокусировкой // *Зарубежная электроника. Успехи современной радиоэлектроники*, "Радиоэлектроника", М., 1999, в.3, с.63-72.
 10. Е.В. Гусев, С.Ю. Кривуля и др. Исследование ускоряющей структуры ускорителя дейтронов МЛЮД-3 // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Ядерно-физические исследования»*, 1989, 5(5), с.37-39.
 11. Е.В. Гусев, П.А. Демченко и др. Группирователь пучка линейного ускорителя дейтронов // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*, 2008, 4(6), с.322-326.
 12. Л.Д. Лобзов, Е.В. Гусев. Система ВЧ-питания линейного протонного ускорителя на энергию 10 МэВ с модифицированной переменнo-фазовой фокусировкой пучка // *Вестник Харьковского университета, № 569. Сер. Физическая «Ядра, частицы и поля»*. 2002, в.3(19), с 83-87.

Статья поступила в редакцию 28.10.2009 г.

LINEAR DEUTERON ACCELERATOR FOR ELEMENT ANALYSIS

S.A. Vdovin, Ye.V. Gussev, P.O. Demchenko, M.G. Shulika

Main parameters and design features of an applied deuteron linac with energy of 3 MeV for element activation analysis of materials are presented. A beryllium target is proposed to use for neutron production. For an averaged beam current $\sim 200 \mu\text{A}$ the neutron yield is supposed to be $\sim 4 \cdot 10^{11}$ n/s. The linac represents an H-cavity loaded by drift tubes. Electric potential distribution on the drift tubes corresponds to π -mode wave. Beam dynamics stability is achieved using the modified alternative-phase focusing.

ЛІНІЙНИЙ ПРИСКОРЮВАЧ ДЕЙТРОНІВ ДЛЯ ЕЛЕМЕНТНОГО АНАЛІЗУ

С.О. Вдовін, Є.В. Гусєв, П.О. Демченко, М.Г. Шуліка

Подано основні характеристики та особливості побудови лінійного прискорювача дейтронів з енергією 3 МэВ для активаційного аналізу елементного складу матеріалів. Щоб отримати нейтрони, передбачається застосувати берилієвий конвертор. При середньому струмі пучка $\sim 200 \mu\text{A}$ очікуваний вихід нейтронів має складати $\sim 4 \cdot 10^{11}$ н/с. Прискорювач являє собою *H*-резонатор, навантажений трубками дрейфу. Розподіл потенціалу на трубках дрейфу відповідає π -моді коливань. Динамічна стійкість пучка у процесі прискорення досягається за рахунок модифікованого змінно-фазового фокусування.