

ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ДЛЯ ОБЛУЧЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

С.Н. Дубнюк, Б.В. Зайцев

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

E-mail: sergdubnyuk@rambler.ru

Приведены основные параметры линейного ускорителя ионов гелия. В ускорителе выбран встречно-штыревой вариант ускоряющей структуры, возбуждаемой на H_{111} -волне. С помощью сравнительного анализа численного моделирования и экспериментальных исследований динамики частиц в ускорителе определены режимы облучения образцов конструкционных материалов ядерно-энергетических установок.

ВВЕДЕНИЕ

Основными задачами развития атомной и термо-ядерной энергетики являются продление ресурса действующих реакторов типа ВВЭР, разработка и исследование новых материалов термоядерных реакторов (ТЯР). Жесткие условия эксплуатации предъявляют повышенные требования к функциональным свойствам конструкционных материалов и вызывают необходимость их совершенствования применительно к АЭС и ТЯР [1].

Вследствие ядерных и термоядерных реакций, в конструкционных материалах происходит значительное накопление гелия, который сильно влияет на радиационное распухание, высокотемпературное и низкотемпературное радиационное упрочнение и охрупчивание, радиационно-ускоренную ползучесть, эрозию [2 - 6] и т.д.

Эксперименты по изучению влияния гелия, образующегося в процессе облучения в ядерно-энергетических установках, требуют большой затраты времени и довольно сложны. В связи с этим при исследовании влияния гелия на изменение структуры и свойства материалов применяются методы, в которых внедрение гелия осуществляется путем бомбардировки ионами гелия на ускорителе [6].

Целью данных исследований является обоснование возможности применения линейного ускорителя ионов гелия с энергиями от 0,12 до 4 МэВ для имитации процессов, происходящих в материалах ядерных и термоядерных реакторов во время их эксплуатации.

1. УСКОРИТЕЛЬ ИОНОВ ГЕЛИЯ

Для облучения конструкционных материалов ионами гелия в ННЦ ХФТИ разработан, изготовлен и запущен в эксплуатацию линейный ускоритель ионов гелия с энергией до 4 МэВ [7], который включает в себя инжектор ионов гелия и ускоряющую структуру. Инжектор состоит из источника ионов (дуоплазматрон), системы вытягивания и фокусировки пучка, а также ускоряющей трубки, и позволяет получать пучки ионов гелия с энергией до 140 кэВ. Основные параметры инжектора приведены в Табл. 1.

В ускорителе выбран встречно-штыревой вариант ускоряющей структуры, возбуждаемый на H_{111} -волне [8].

Таблица 1

Параметры инжектора

Рабочий газ	гелий
Ток дуги, А	2...4
Ток пучка на выходе, мА	до 20
Энергия частиц на выходе, кэВ	до 140
Диаметр пучка на выходе, мм	~ 8
Давление рабочего газа в анодной области источника, мм рт. ст.	$5 \cdot 10^{-3}$
Частота посылок, Гц	2...10
Длительность импульса модулятора дуги, мкс	500
Магнитное поле в источнике, эрстед	300...700

Преимущества этой структуры в рассматриваемом диапазоне энергий ионов заключается в ее малогабаритности, высоком темпе ускорения и высоких электродинамических характеристиках, обеспечивающих стабильность работы и экономичный режим питания ВЧ-мощностью.

Таблица 2

Параметры ПОС-4

Энергия ионов на входе, кэВ/нукл.	30
Энергия ускоренных ионов, кэВ/нукл.	975
Отношение массы ионов к заряду	4
Рабочая частота, МГц	47,2
Максимальное ускоряющее поле, кВ/см	85
Общий темп ускорения, МэВ/м	1,6
Длина резонатора, м	2,39
Диаметр резонатора, см	107,5
Количество трубок дрейфа	32
Импульсный ток ускоренных ионов, мА	6
Входной импульсный ток, мА	30
Частота следования импульсов, Гц	12,5
Добротность резонатора	10000
Шунтовый импеданс, МОм/м	50

Встречно-штыревая ускоряющая структура является оптимальной для использования наиболее простого и эффективного метода обеспечения радиально-фазовой устойчивости пучка вдоль ускоряющего канала, каким является переменнo-фазовая фокусировка (ПФФ) в варианте с шаговым изменением синхронной фазы [8]. Полученные в результате расчетов и настройки параметры ускорителя представлены в Табл. 2. Ускоряющая структура представлена на Рис. 1.



Рис. 1. Фото ускоряющей структуры линейного ускорителя ионов гелия

2. ДИНАМИКА ПУЧКОВ ИОНОВ He⁺

Созданный линейный ускоритель ионов гелия предназначен для ускорения He⁺ до энергии от 30 до 975 кэВ/нукл. Расчет его ускоряюще-фокусирующего тракта заключался в том, чтобы при максимальном коэффициенте захвата частиц в режим ускорения сформировать сгусток максимально сжатый по фазам при минимальном росте эмиттанса пучка и высоким темпе ускорения. Решение данной задачи осуществляется в два этапа. На первом этапе для ускоряюще-фокусирующих полей используется приближение «квадратной» волны [9]. Уравнение движения в линейном приближении в системе координат, жестко связанной с синхронной частицей, имеет вид [10]:

$$\begin{aligned} \ddot{r} - \frac{1}{2} \omega_\phi^2 \sin \varphi_i \eta(z) r &= 0, \\ \ddot{q} + \omega_\phi^2 \sin \varphi_i \eta(z) q &= 0, \end{aligned}$$

где $\omega_\phi^2 = \frac{e}{mc} \frac{E_i}{\beta_c \omega}$; β_c – относительная скорость синхронной частицы, определяемая уравнением движения: $\dot{\beta}_c - \frac{e}{mc\omega} E_i \cos \varphi_i \eta(z) = 0$, где ω – частота ВЧ-поля; e – элементарный заряд; c – скорость света; φ_i – равновесная фаза для i -го зазора, в котором находится сгусток; E_i – амплитуда ВЧ-поля на оси ускоряющего зазора; функция $\eta(z)$ равна нулю в трубке дрейфа и единице в зазоре.

Число зазоров на периоде фокусировки и предварительное распределение значений синхронных фаз по зазорам определяется из условия обеспечения одновременной устойчивости радиального и продольного движения частиц. В основу определения устойчивости движения частиц положен матричный метод [9].

Оценка области захвата ионов в режим ускорения в ускорителях с ПФФ проводится на основе анализа гамильтониана движения частиц в осесимметричном переменном ускоряющем поле. Представим гамильтониан в виде [10]:

$$\begin{aligned} H &= \frac{\dot{\psi}^2}{2} + \frac{(k_z \dot{r})^2}{2} + \omega_\phi^2(\tau) \times \\ &\times \{ \sin[\psi + \varphi_s(\tau)] I_0(k_z r) - \psi \cos \varphi_s(\tau) \}, \end{aligned}$$

где $\psi, \dot{\psi}$ – продольная полуось сгустка и скорость ее изменения в угловых переменных; r, \dot{r} – радиальный размер сгустка и скорость его изменения; $k_z = 2\pi/L = 2\pi/\beta\lambda$ – волновое число; $I_0(x)$ – модифицированная функция Бесселя; $\varphi_s(\tau)$ – значение равновесной фазы; $\tau = \omega t/\pi n$ – безразмерное время; n – число зазоров в одном периоде фокусировки;

$$\omega_\phi^2(\tau) = \frac{\pi^2 n^2 E_i e}{m\omega} \eta(\tau).$$

Усредняя гамильтониан по быстрому времени методом Крылова-Боголюбова [11], получаем для потенциальной функции усредненного движения:

$$\begin{aligned} V(\bar{\psi}, \bar{k}_z r) &= \alpha \cdot \cos \bar{\psi} \cdot I_0(\bar{k}_z r) + \omega_{cp}^2 \cdot [\sin \bar{\psi} \cdot I_0(\bar{k}_z r) - \bar{\psi}] + \\ &+ \frac{\gamma^2}{16\pi^2} [\sin^2 \bar{\psi} \cdot I_0^2(\bar{k}_z r) + \cos^2 \bar{\psi} \cdot I_1^2(\bar{k}_z r)], \end{aligned}$$

где $\alpha = a_0/2, \gamma = a_1$ – первые два коэффициента разложения функции $\omega_\phi^2(\tau) \cdot \sin \varphi_s(\tau)$ в ряд Фурье по косинусам на отрезке $\tau \in [0, 1]$,

$$\omega_{cp}^2 = \int_0^1 \omega_\phi^2(\tau) \cos \varphi_s(\tau) d\tau,$$

черта над функцией обозначает усреднение по «быстрому» времени. Захват частиц в режим ускорения будет максимальным, если глубина продольного и поперечного сечения потенциальной ямы одинакова $\Delta V_r = \Delta V_\psi$, где:

$$\begin{aligned} \Delta V_r &= \alpha \cdot [I_0(k_z r) - 1] + \frac{\gamma^2}{16\pi^2} \cdot I_1(k_z r), \\ \Delta V_\psi &= \frac{\omega_{cp}^2}{4} \cdot \psi_{\max}^2, \psi_{\max} = \frac{2}{\omega_{cp}^2} \cdot \left[-\alpha + \frac{\gamma^2}{8\pi} \right]. \end{aligned}$$

Это условие использовалось для предварительного расчета ускоряюще-фокусирующего канала с ПФФ. На следующем этапе полю «квадратной» волны с помощью программы APFRFQ [12] сопоставляется эквивалентная реальная геометрия ускоряющих зазоров с учетом влияния сил объемного заряда на динамику частиц. Схематический вид линейного ускорителя представлен на Рис. 2.

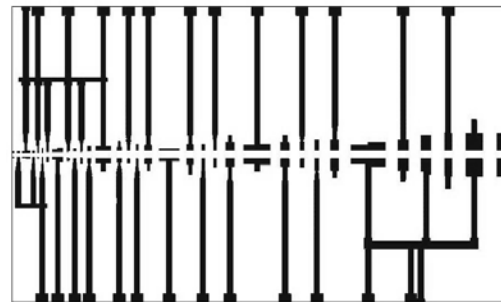


Рис. 2. Схематический вид ускоряющей структуры линейного ускорителя

В результате изготовления и настройки ускорителя на рабочий режим были изменены некоторые параметры трубок дрейфа (внешний и внутренний диаметры и радиусы закруглений), относительно расчетных значений. На Рис. 3 прорисован характер изменения напряженности электрического поля (в относительных единицах) на оси резонатора, полу-

ченный при численном моделировании поперечной геометрии ускоряющей структуры (точками отмечены значения, которые задаются расчетом динамики ускоренного пучка, звездочками – экспериментальные). Отклонения экспериментальных значений электрических полей в зазорах от расчетных находятся в допустимых пределах.

E , отн. ед

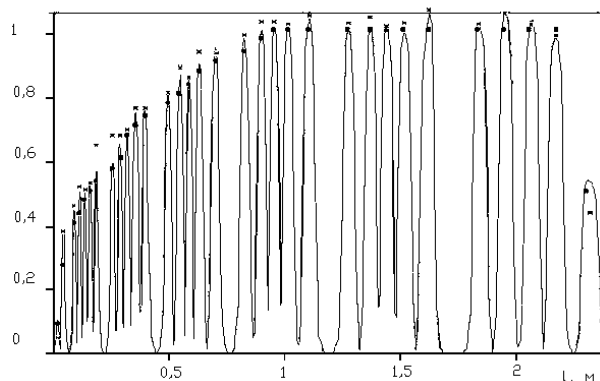


Рис. 3. Распределение электрического поля в структуре на рабочей частоте 47,2 МГц

(• – расчетное по моделированию, заданное динамикой пучка; * – экспериментальное)

Полученные в ходе экспериментов входные параметры пучка также отличаются от расчетных значений. Поэтому возникла необходимость повторного моделирования динамики частиц для реальной геометрии ускоряюще-фокусирующего тракта при экспериментально измеренных амплитудных значениях ВЧ-полей в ускоряющих зазорах. На Рис. 4 показаны входные параметры для экспериментально полученного расходящегося пучка (слева на право): продольные эмиттансы в плоскостях xx' , yy' , радиальный профиль пучка, фазовый портрет.

Численное моделирование пучка проводилось по программе APFRFQ [12]. Моделирование сил кулоновского взаимодействия проводилось методом частица-сетка [13]. Начальное число частиц 10000. Входной ток 3 мА. Расчетная величина тока на выходе 0,45 мА. Экспериментально полученные значения 0,3...0,4 мА.

При этом расчетные значения тока пучка (входной ток 3 мА), если на вход в структуру приходится кроссовер пучка, на выходе составляют 1 мА. Максимальный ток при входном токе 30 мА достигает 6 мА. Таким образом, дополнительное согласование параметров пучка на входе в ускоряющую структуру и увеличение тока инжекции, позволят существенно повысить ускоряемый ток. В Табл. 3 представлены: 1 – расчетные данные ускоряющей структуры, 2 – расчетные данные для экспериментально полученного пучка, 3 – экспериментально полученные результаты.

Таблица 3

	$I_{\text{пуч.}}$ на входе в ускоритель, мА	$I_{\text{пуч.}}$ на выходе ускорителя, мА
1	30	6
2	3	0,45
3	3	0,3...0,4

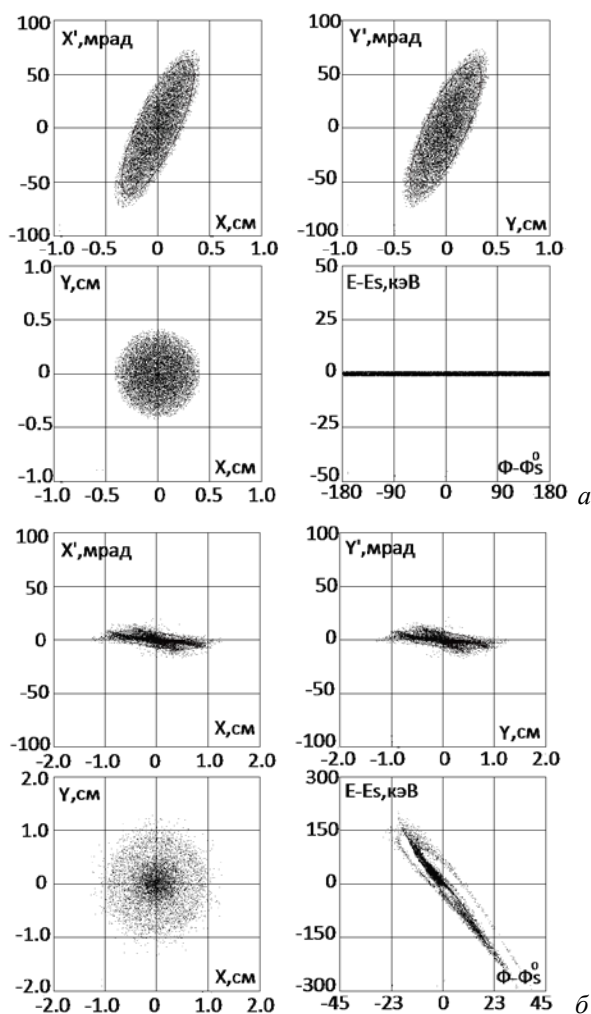


Рис. 4. Входные (а) и выходные (б) параметры пучка

В итоге были определены для данного ускорителя режимы облучения конструкционных материалов, которые представлены в Табл. 4.

Таблица 4

Ток ионов гелия (120 кэВ) на входе ускорителя, мА	2,7...3
Импульсный ток ускоренных ионов гелия, мкА	300...400
Плотность среднего тока, мкА/см ²	0,15...0,2
Частота следования импульсов, Гц	2,5
Длительность импульса пучка, мкс	500

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

На линейном ускорителе ионов гелия были проведены эксперименты по облучению ряда конструкционных материалов: X18H10T, сталь-3, Zr+2.5%Nb, Zr, Zr+1%Nb, Nb, Nb+1%Zr, и изучению их свойств после облучения [7]. Особое внимание было уделено методическим экспериментам, которые подтвердили правильность выбора всех разработанных экспериментальных устройств.

В ходе облучения конструкционных материалов проводились измерения температуры образца, тока пучка и дозы облучения. Для этого использовался аналого-цифровой преобразователь ZET-210 «Sigma USB», подключенный к персональному компьютеру. Создан программно-аппаратный комплекс, поз-

воляющий проводить необходимые измерения с последующим сохранением данных в цифровом виде [7].

Для измерения тока пучка ионов и отработки оптимальных режимов ускорителя были разработаны и изготовлены три пролетных датчика тока, установленные на выходе ускорительной трубки инжектора, на входе в ускоряющую структуру и на выходе ускоряющей структуры перед камерой облучения образцов.

Температура образца при облучении измерялась хромель-алюмелевой термопарой, прикрепленной к образцу с противоположной стороны по отношению к падающему пучку [7]. Градуировка термопары проводилась с учетом длины измерительных проводов.

Измерение дозы облучения происходило путем измерения пикового значения напряжения с индукционного пролетного датчика, установленного на выходе ускоряющей структуры с частотой 10 Гц, с последующим усреднением и суммированием сигналов.

Для проверки правильности регистрации дозы облучения были проведены облучения циркония (99,999%), размер зерна – 2...5 мкм, ионами гелия с энергией 20 кэВ (на инжекторе ионов) и 4 МэВ (на линейном ускорителе ионов). Дозы облучения были одинаковы и составляли $5 \cdot 10^{15} \text{ 1/см}^2$. За «эталонную» дозу была принята доза облучения образца, облученного ионами гелия с энергией 20 кэВ.

Поведение гелия в облученных образцах изучали при помощи методики стимулированной термодесорбции, которая состоит в измерении парциального давления гелия, выделяющегося из исследуемого образца, в процессе постимплантационного линейного повышения его температуры. В экспериментах использовалась методика термодесорбции в динамическом режиме, при котором давление газа в камере пропорционально скорости его десорбции из металла. Образцы исследовались в температурном интервале 0...1500°C, скорость их нагрева была одинакова и составляла 3,4°C/с. На Рис. 5 и 6 приведены спектры термодесорбции гелия, имплантированного в образец с энергией 20 кэВ и 4 МэВ соответственно.

Выход гелия из образца облученного ионами гелия с энергией 20 кэВ начинается при температуре 850°C, максимум находится при $T=1070...1080^\circ\text{C}$. Выход гелия из образца облученного ионами гелия с энергией 4 МэВ начинается при температуре 550°C, первый максимум находится при $T=1080^\circ\text{C}$, второй максимум при $T=1240...1250^\circ\text{C}$. После этого были измерены площади под кривыми Рис. 5 и 6, которые оказались приблизительно одинаковыми. Это означает, что в пределах экспериментальных ошибок определение дозы облучения на линейном ускорителе ионов гелия полностью соответствует «эталонной» дозе. Следовательно, метод определения дозы облучения на ускорителе выбран правильно. Из приведенных выше графиков термодесорбции гелия из циркония следует, что в облученном образце ионами гелия с энергией 4 МэВ в диффузию, кроме

вакансионного механизма, включается дополнительный механизм, вероятно межзеренный. Полные методические эксперименты, проведенные на ускорителе ионов гелия, приведены в работе [7].

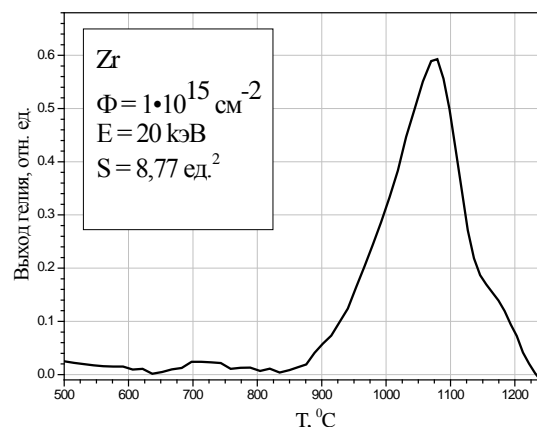


Рис. 5. Спектр термодесорбции гелия из циркония при энергии облучения 20 кэВ

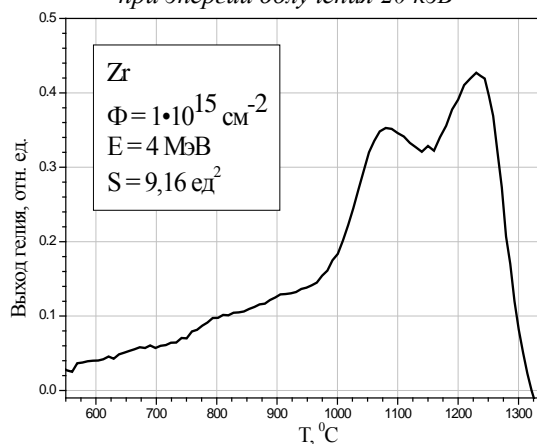


Рис. 6. Спектр термодесорбции гелия из циркония при энергии облучения 4 МэВ

Для экспериментальной дозы облучения (скорость имплантации гелия $10^{12}/\text{с}$) были определены значения аррм в образцах циркония ($\approx 25 \text{ аррм}$), что соответствует годовым значениям аррм в реакторах на тепловых и быстрых нейтронах [1]. При дальнейшем увеличении ускоренного тока возможно достижение значений аррм, соответствующих годовым значениям аррм в термоядерных реакторах [1].

ВЫВОДЫ

Создан и запущен в эксплуатацию линейный ускоритель ионов гелия с энергией ионов до 4 МэВ на выходе ускорителя. Проведены численные и экспериментальные исследования динамики пучков ионов He_4^+ , которые показали, что дополнительное согласование параметров пучка и увеличение тока инъекции позволит существенно повысить ускоренный ток. Разработана методика регистрирования температуры образца, тока пучка ионов и дозы облучения во время эксперимента. Полученные значения аррм для облученных образцов циркония соответствуют значениям аррм для реакторов на тепловых и быстрых нейтронах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.Н. Воеводин. Конструкционные материалы ядерной энергетики – вызов 21 века // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2007, №2 (90), с. 10-22.
2. В.Н. Воеводин, И.М. Неклюдов. Современный статус материалов ядерной энергетики – микро-структурная эволюция и радиационная стойкость // *Труды XVIII ICPRТ*. Алушта, Крым, 8-13.09. 2008, с. 4-5.
3. И.М. Неклюдов, Г.Д. Толстолуцкая. Гелий и водород в конструкционных материалах // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2003, №3, с. 3-14.
4. В.В. Ружицкий, Г.Д. Толстолуцкая, И.Е. Копанец, Б.С. Сунгуров. Влияние радиационных повреждений на термодесорбцию гелия из ферритно-мартенситной стали ЭП-450 // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2012, №2, с. 16-21.
5. И.М. Неклюдов, В.Ф. Рыбалко, Г.Д. Толстолуцкая. Эволюция профилей распределения гелия и водорода в материалах в процессе облучения и отжига. Москва: «ЦНИИАтоминформ». 1985, с. 41.
6. А.Г. Залужный, Ю.Н. Сокурский, В.Н. Тебус. Гелий в реакторных материалах. М.: «Энергоатомиздат», 1988.
7. Р.А. Анохин, В.Н. Воеводин, С.Н. Дубнюк и др. Методика и экспериментальные данные облучения конструкционных материалов ионами гелия на линейном ускорителе // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2012, №5, с. 123-130.
8. В.А. Бомко, А.Ф. Кобец, С.С. Тишкин и др. Вариант переменного-фазовой фокусировки с шагом изменением синхронной фазы // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2004, №2, с. 153-155.
9. И.М. Капчинский. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях. Москва: «Атомиздат», 1966, с. 310.
10. А.Н. Коростелев, Н.С. Репалов, В.И. Трофименко, Н.А. Хижняк. Нелинейная теория движения сгустка заряженных частиц в высокочастотных и ускоряющих полях: Препринт. Харьков: «ЦНИИ атоминформ». 1990, 12 с.
11. Н.Н. Боголюбов, Ю.А. Митропольский. Асимптотические методы в теории линейных колебаний. Москва: «Наука», 1977.
12. С.С. Тишкин. Комбинированная фокусировка высокочастотным полем в линейных ускорителях ионов // *Вестник Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина. Серия физическая «Ядра, частицы, поля»*. 2008, № 808, с. 37-46.
13. Р. Хокни, Дж. Исвуд. Численное моделирование методом частиц. Москва: «Мир», 1987, с. 640.

Статья поступила в редакцию 07.02.2014

THE LINEAR ACCELERATOR FOR RADIATION STRUCTURAL MATERIALS

S.N. Dubniuk, B.V. Zajtsev

Basic parameters of the linear accelerator helium ions are given. Interdigitated accelerating structure excited by H_{111} -wave was selected. Irradiation regimes samples of structural materials of nuclear power plants were determined by comparative analysis of numerical modeling and experimental studies of the dynamics of particles through an accelerator.

ЛІНІЙНИЙ ПРИСКОРЮВАЧ ДЛЯ ОПРОМІНЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

С.М. Дубнюк, Б.В. Зайцев

Наведено основні параметри лінійного прискорювача іонів гелію. У прискорювачі обрано зустрічно-штировий варіант прискорювальної структури, збуджуваної на H_{111} -хвилі. За допомогою порівняльного аналізу чисельного моделювання та експериментальних досліджень динаміки частинок у прискорювачі визначені режими опромінення зразків конструкційних матеріалів ядерно-енергетичних установок.