

## РАЗВИТИЕ РАДИАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ЛУМЗИ

*Б.В. Зайцев\*, В.А. Бомко, А.Ф. Дьяченко, А.Ф. Кобец, Ю.В. Мелешкова, Л.С. Ожигов,  
К.В. Павлий, А.А. Пархоменко, С.С. Тишкин*

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

*\*E-mail: zajtsev@kipt.kharkov.ua*

Рассмотрен вопрос о методическом обеспечении экспериментальных работ по радиационному материаловедению на ускорителе ЛУМЗИ. Для облучения материалов протонами и ионами гелия создана новая начальная часть линейного ускорителя тяжелых ионов (ПОС-4). Для облучения ионами тяжелых металлов (азота, алюминия, железа, никеля и т.д.) рассчитан ускоряюще-фокусирующий тракт начальной части ЛУМЗИ с комбинированной фокусировкой ВЧ-полем (ПОС-15). Разработаны и созданы экспериментальные устройства для облучения конструкционных материалов и изучения механических свойств (ползучесть, релаксация напряжений, активное деформирование, размерная стабильность) под пучком ионов.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В связи с завершением проектного ресурса ряда энергоблоков АЭС в Украине необходимо «научно-техническое обоснование возможности продления срока эксплуатации атомных блоков» [1-3]. Механические свойства конструкционных материалов во многом определяют работоспособность конструкций активной зоны АЭС. Используя ускоренные заряженные частицы можно практически полностью моделировать процессы, происходящие при радиационном воздействии в активных зонах реакторов при стационарных и переходных режимах эксплуатации. Поэтому исследование воздействия заряженных частиц на материалы [4], в связи с проблемой определения радиационных характеристик конструкционных материалов и использования их в реакторостроении, является актуальным. К таким исследованиям относится изучение особенностей изменения механических свойств (ползучесть, релаксация напряжения, активное деформирование) и размерной стабильности материалов при облучении их ионами высоких энергий, которые определяются радиационной эволюцией микроструктуры и состава исследуемого материала [5]. Изучению взаимодействия заряженных ионов с различными материалами посвящено большое количество экспериментальных работ [6], это имеет большое значение для понимания основных закономерностей этих процессов и важно для использования радиационных эффектов в развитии новых технологий.

Основные физические процессы, происходящие при взаимодействии ионов с твердым телом, в значительной степени понятны [7], однако для технологических целей и обоснования работоспособности конструкционных материалов требуется более углубленное знание процессов как после облучения, так и в процессе облучения.

### 2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

При работе конструкционных материалов в активных зонах атомных реакторов основной задачей является достижение доступных изменений механических свойств и размерной стабильности конструкционных материалов с целью обеспечения на-

дежности и долговечности элементов конструкций. Следует рассматривать влияние газового накопления и создание смещений в материалах на вышеперечисленные характеристики в зависимости от внешних параметров облучения, температурных режимов и прикладываемых нагрузок. Оптимальным вариантом для проведения экспериментальных работ является одновременное воздействие ионов газов и более тяжелых ионов для создания повреждаемости материалов, т. е. необходимо изучать эти характеристики под воздействием двух «сортов» ионов одновременно. Комплексное изучение механических характеристик конструкционных материалов под пучками ионов газов и тяжелых ионов даст возможность выявить влияние доз облучения, плотностей ионных потоков, температуры, внешнего напряжения и т.д.

Таблица 1  
Основные характеристики ионов, используемых для радиационных исследований (ЛУМЗИ)

Секции ЛУМЗИ	Тип частиц	$E_{\max}$ , МэВ	Повреждаемость, с.н.а.
ПОС-4 + основная секция	$\alpha$	34	$2 \cdot 10^{-5}$
	$p^+$	8,5	-
ПОС-15 + основная секция	$N^{1+}$	119	$2,1 \cdot 10^{-4}$
	$Ar^{3+}$	340	$1,6 \cdot 10^{-3}$
	$Ca^{3+}$	340	$1,9 \cdot 10^{-3}$
	$Al^{3+}$	230	$7,8 \cdot 10^{-4}$
	$Ti^{4+}$	408	$4,2 \cdot 10^{-3}$
	$V^{4+}$	435	$2,8 \cdot 10^{-3}$
	$Fe^{4+}$	500	$3,4 \cdot 10^{-3}$
	$Co^{(4,5)+}$	510	$3,7 \cdot 10^{-3}$
	$Cu^{(4,5)+}$	550	$4,4 \cdot 10^{-3}$
	$Zn^{5+}$	570	$4,9 \cdot 10^{-3}$
	$Kr^{5+}$	700	$6,8 \cdot 10^{-3}$
$Zr^{6+}$	770	$9 \cdot 10^{-3}$	

Целью настоящей работы является разработка методик и экспериментальных средств для изучения механических характеристик (ползучести, релаксации напряжения, активного деформирования) и размерной стабильности металлов в процессе ионного облучения и после него. Основные характеристики

ионных пучков, получаемых на ЛУМЗИ, которые необходимо использовать при изучении радиационных свойств конструкционных материалов, приведены в табл. 1. Максимальная энергия частиц в таблице дана с учетом основной секции, это же касается и оценки повреждаемости.

Схема и фотография ЛУМЗИ представлены на рис. 1, 2 соответственно. Основные характеристики ПОС-4 и ПОС-15 будут приведены ниже.

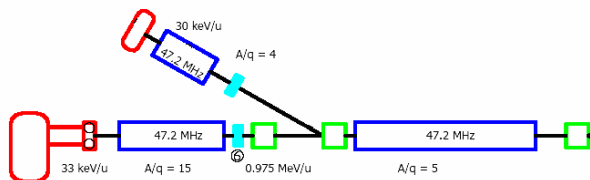


Рис. 1. Схема комплекса ЛУМЗИ



Рис. 2. Фотография ЛУМЗИ. На заднем плане – основная секция; слева – ПОС-4; справа – ПОС-15

В табл. 2 показаны планируемые экспериментальные работы, которые будут проводиться на ЛУМЗИ.

Таблица 2  
Планируемые эксперименты на ЛУМЗИ

Тип экспериментов	Измеряемые эффекты
Облучение с последующим исследованием	Структурные изменения, упрочнение, охрупчивание, механические характеристики
Облучение под напряжением	Ползучесть, охрупчивание, размерная стабильность
Активное деформирование под пучком	Охрупчивание, пределы прочности, пластичности
Релаксация напряжения под пучком	Охрупчивание, механические характеристики

Это позволит определить изменение механических характеристик конструкционных материалов от внешних параметров облучения, температурного режима и прикладываемых нагрузок.

### 3. НАЧАЛЬНАЯ ЧАСТЬ ЛУМЗИ, ПОС-4

Новая предобдирочная секция ПОС-4 ЛУМЗИ предназначена для ускорения ионов  $He^+$  до энергии 1 МэВ/нукл. (входная энергия – 30 кэВ/нукл.), кроме

того, ее можно использовать для ускорения протонов. В ускоряющей структуре ПОС-4 встречно-штыревого типа для фокусировки пучка используется метод переменного-фазовой фокусировки с шаговым изменением синхронной фазы вдоль фокусирующих периодов [8]. Эффективность этого метода зависит от конфигурации фокусирующего периода, которая содержит несколько ячеек с синхронной фазой, изменяющейся дискретно от ячеек с отрицательными (группирующими) фазами, проходя через ячейки с малым абсолютным значением в зону с положительными (фокусирующими) фазами и наоборот. Такой выбор синхронных фаз обеспечивает захват пучка ионов высокой интенсивности в фазовом угле  $120^\circ$  и радиальную и фазовую устойчивость сгустков ионов вдоль ускоряющей структуры. Для того чтобы обеспечить максимальный захват частиц ( $120^\circ$ ) в режим устойчивого радиального и продольного движения, ускоряющее поле в начальной части структуры было сделано нарастающим. Схематический вид ПОС-4 приведен на рис. 3, а окончательный вид резонатора – на рис.4.

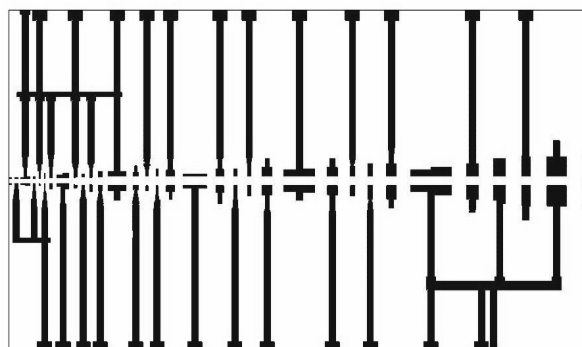


Рис. 3. Схематический вид ускоряющей структуры ПОС-4



Рис. 4. Внутренний вид резонатора ПОС-4

Моделирование динамики частиц производилось следующим образом. По измененной геометрии ускоряюще-фокусирующего тракта были вычислены напряженности полей в ускоряющих зазорах и нормированы в соответствии с экспериментальными значениями. Численный расчет динамики производился с учетом вычисленных полей, с силами пространственного заряда. Основные результаты численного моделирования показаны в табл. 3.

При сборке и настройке ПОС-4 возникла проблема локального изменения резонансной частоты при сохранении требуемого распределения электрического поля в Н-структурах. Обычно созданные элементы регулировки частоты действуют только в направлении повышения частоты. Задача создания эффективных элементов воздействия на характеристики структуры с целью снижения ее резонансной частоты потребовала новых подходов, проведения численных расчетов и экспериментальных исследований [9]. В результате этого разработаны новые элементы настройки, названные «контриками», которые устанавливались на некоторых трубках дрейфа [10]. Они проявили себя как эффективный элемент настройки, локально влияющий на величину электрического поля в ближайших зазорах и понижающий резонансную частоту без заметного ухудшения электродинамических характеристик резонансной системы. В результате совокупного воздействия всех элементов настройки получено заданное распределение электрического поля в структуре на рабочей частоте 47,2 МГц. Общий вид новой предобдирочной секции ПОС-4 в главном зале ЛУМЗИ показан на рис. 2.

Таблица 3

Основные входные и вычисленные параметры

Рабочая частота, МГц	47,2
Входной импульсный ток, мА	30
Входной нормализованный gms эмиттанс в плоскости X, см·мрад	0,0134
Входной нормализованный gms эмиттанс в плоскости Y, см·мрад	0,0132
Входной нормализованный 99% эмиттанс в плоскости X, см·мрад	0,0763
Входной нормализованный 99% эмиттанс в плоскости Y, см·мрад	0,0755
Выходной импульсный ток, мА	6,2
Выходной нормализованный gms эмиттанс в плоскости X, см·мрад	0,0584
Выходной нормализованный gms эмиттанс в плоскости Y, см·мрад	0,0568
Выходной нормализованный 99% эмиттанс в плоскости X, см·мрад	0,7809
Выходной нормализованный 99% эмиттанс в плоскости Y, см·мрад	0,7723

#### 4. НАЧАЛЬНАЯ ЧАСТЬ ЛУМЗИ, ПОС-15

В настоящее время с целью увеличения выходного тока возникла необходимость в разработке ускоряюще-фокусирующего тракта начальной части ускорителя (НЧУ) для ЛУМЗИ со следующими параметрами: энергия инжекции 500 кэВ, импульсный ток  $\geq 5$  мА, отношение массового числа к зарядовому ( $A/Q$ ) = 15. В качестве НЧУ широкое применение получила ускоряющая структура с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ) [11]. Структуры с ПОКФ обеспечивают 95% захват заряженных частиц в режим ускорения. Однако темп ускорения таких ускорителей не превышает 0,6...0,8 МэВ/м. В данной работе представлена ускоряющая структура с комбинированной высоко-частотной фокусировкой (КВЧФ), которая позволит

выдерживать все входные параметры для основной секции ЛУМЗИ с необходимыми геометрическими размерами [12]. КВЧФ является дальнейшим развитием идеи переменного-фазовой фокусировки (ПФФ) [13, 14], в которой знакопеременная модуляция ВЧ-поля производится по всем трем пространственным координатам. Реализовать такой тип фокусировки можно на базе модифицированной переменного-фазовой фокусировки (МПФФ) [15], включив в фокусирующий период высокочастотные квадрупольные [16]. На рис. 5 показан участок Н-структуры, содержащий один ускоряюще-фокусирующий период с КВЧФ.

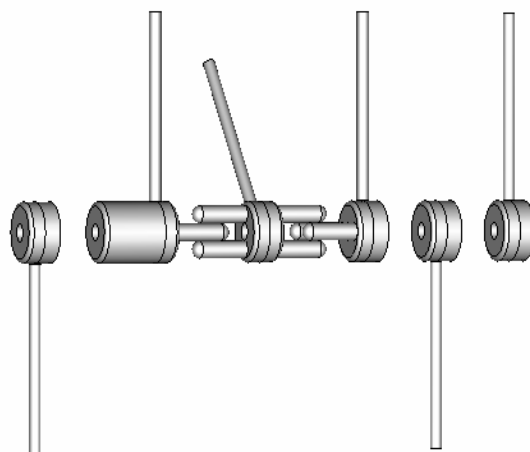


Рис. 5. Участок Н-структуры, содержащий фокусирующий период КВЧФ

Идея комбинации МПФ и ВЧ-квадрупольной фокусировки заключается в следующем. В МПФФ для создания устойчивого движения используется осесимметричное ВЧ-поле, обеспечить радиальную устойчивость можно только за счет ослабления продольной устойчивости и наоборот. Обеспечить радиальную устойчивость движения пучка можно с помощью ВЧ-квадрупольного поля, в этом случае устойчивость радиального и поперечного движения сгустка заряженных частиц обеспечивается независимо друг от друга. Расчет параметров ускоряюще-фокусирующего тракта НЧУ и моделирование динамики частиц проводились в среде разработки APFRFQ [16]. Основные характеристики ускоряюще-фокусирующего тракта НЧУ приведены в табл. 4, в табл. 5 - параметры ускоряемого пучка.

Таблица 4

Основные параметры НЧУ с КВЧФ

Рабочая частота, МГц	47,2
Длина канала, см	642
Число ускоряющих зазоров	78
Апертура (радиус) канала, см	0,4...0,7
Структура фокусирующего периода	ОДФОО
Распределение фаз синхронных частиц на основном фокусирующем периоде	$-70^0, 0^0,$ $0^0, 0^0,$ $-40^0$
Максимальная напряженность поля на поверхности электродов, кВ/см	185

В результате проведенных вычислений по динамике ионов гелия в ПОС-4, можно сделать вывод, что при входном токе 30 мА на выходе из секции мы

получаем 6 мА (рис. 6,б). Уменьшение тока происходит практически в начальной стадии ускорения секции, т. е. при малых скоростях ионов. Аналогичный вывод можно сделать и для секции ПОС-15 (см. рис. 6,а). Падение тока на выходе этой секции в 3 раза меньше за счет введения ВЧ-фокусировки в структуру МПФФ. Для предотвращения потерь тока пучка необходимо перед ускоряющей секцией устанавливать ПОКФ, что делается на всех ускорителях тяжелых ионов.

Таблица 5

Расчетные параметры пучка

Энергия инжекции, кэВ/нукл.	33
Выходная энергия, МэВ/нукл.	1
Ток инжекции, мА	10
Ускоренный ток, мА	5,2
Входные поперечные эмиттансы пучка:	
$\varepsilon_x$ (rms); $\varepsilon_y$ (rms);	0,071; 0,070;
$\varepsilon_x$ (100%); $\varepsilon_y$ (100%), мм·мрад	0,432; 0,424
Выходные эмиттансы пучка:	
$\varepsilon_x$ (rms), мм·мрад	0,119
$\varepsilon_y$ (rms), мм·мрад	0,114
$\varepsilon_\eta$ (rms), град·кэВ	1574
$\varepsilon_x$ (99%), мм·мрад	1,207
$\varepsilon_y$ (99%), мм·мрад	1,119
$\varepsilon_z$ (99%), град·кэВ	10029

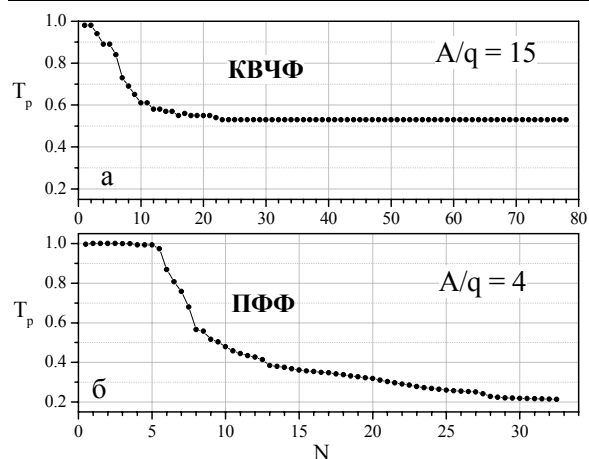


Рис. 6. Зависимость коэффициента трансмиссии пучка от номера зазора: а – для КВЧФ; б – для ПФФ

## 5. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения механических характеристик конструкционных материалов разрабатывается комплекс экспериментальных средств, который позволит проводить облучения образцов пучками ионов и впоследствии изучать ползучесть, релаксацию напряжений, активное деформирование и т.д. облученных образцов в зависимости от различных доз облучения, температуры, плотности ионного потока, времени релаксации (выдержка образцов после облучения) и других параметров. Камера для облучения [17-19] состоит из держателя, в котором располагаются четыре образца на барабане, их последовательно можно облучать без извлечения из камеры. Каждый образец снабжен термопарой для измерения температуры в процес-

се облучения, в камере предусмотрена смена и контроль среды. После облучения всех образцов и необходимой выдержки образцы извлекаются из камеры для изучения физико-механических свойств.

Для исследования ползучести, релаксации напряжений, активного деформирования и размерной стабильности разработано устройство, позволяющее изучать механические характеристики под пучком ионов. На рис. 7 приведена схема (А) и фотография (Б) экспериментального устройства для изучения механических свойств конструкционных материалов под пучком ионов.

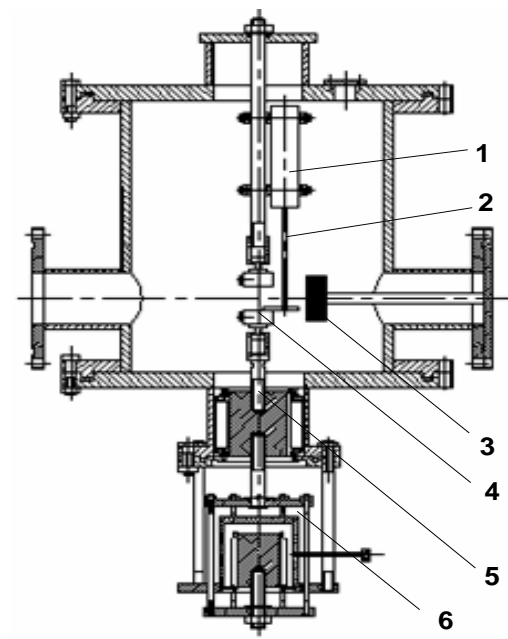


Рис. 7. Схема (А) и фотография (Б) экспериментального устройства для изучения механических свойств материалов под пучком ионов

Устройство состоит из:

- 1) индукционного датчика деформации, который обеспечивает измерение деформации с точностью 1 мкм;
- 2) штока датчика деформации, передающего перемещение нагружающего устройства на датчик деформации, и тем самым, регистрируется деформация образца;
- 3) нагревательного элемента, позволяющего в процессе облучения поддерживать температуру образца в пределах 100...800 °С;
- 4) испытываемого образца с захватами;
- 5) нагружающего штока, который передает нагрузку на образец от сменного пневматического нагружающего устройства;
- 6) съемного пневматического нагружающего устройства. В зависимости от сечения образца можно менять нагружающее устройство, тем самым менять предельные нагрузки на исследуемый образец.

### Индукционный датчик деформации

Датчик выполнен в виде двух последовательно соединенных катушек с ферритовым сердечником. Внешний вид датчика приведен на рис. 8. На рис. 9 показана градуировочная кривая датчика, выполненная в диапазоне температур: 50...120 °С. Линейный участок датчика составляет  $\approx 1000$  мкм, а полный приемлемый измерительный диапазон - 2500 мкм. Это полностью удовлетворяет условиям проведения радиационных испытаний.



Рис. 8. Индукционный датчик деформации

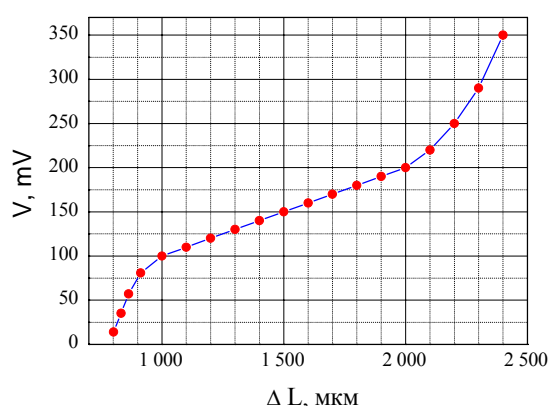


Рис. 9. Кривая градуировки датчика деформации

### Система нагрева

Нагреватель, состоящий из 10 последовательно соединенных элементов, выполнен из нихромовой проволоки диаметром 4,5 мм и имеет общую мощность  $\approx 1000$  Вт, это позволяет осуществлять нагрев образца до 700 °С. В случае повреждения одного нагревательного элемента не нужно будет менять весь нагреватель, достаточно произвести смену одного элемента. На рис. 10 показан нагреватель в рабочем состоянии.



Рис.10. Нагреватель в рабочем состоянии

### Образец

Для механических испытаний конструкционных материалов на растяжение разработана система захватов с исследуемым образцом, приведенная на рис. 11. Толщина образца составляет  $\approx 200$  мкм, что соответствует пробегам ионов гелия и протонов ускоренных ЛУМЗИ. При проведении экспериментов с тяжелыми ионами толщина образца будет уменьшена.

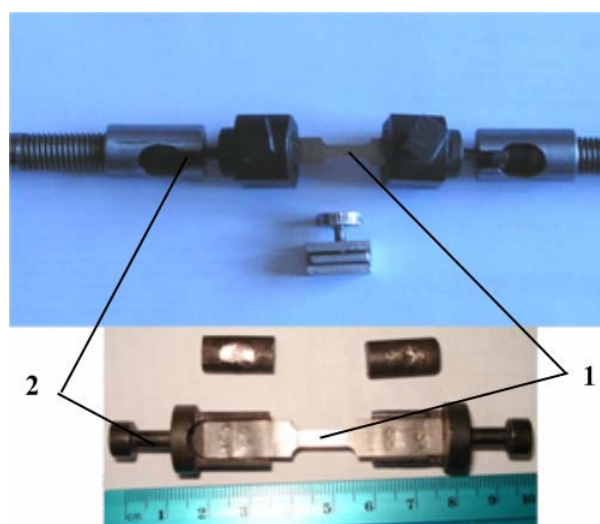
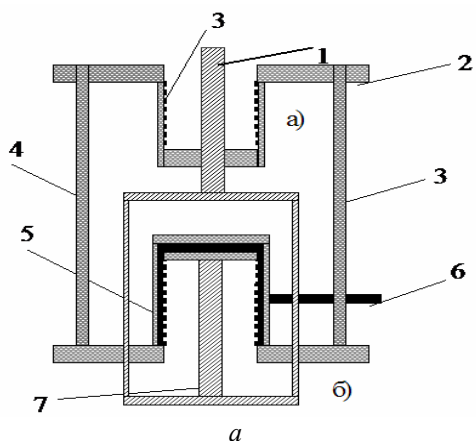


Рис. 11. Исследуемый образец с захватами:  
1 – образец; 2 – захваты

### Нагружающее устройство

Нагружающее пневматическое устройство (рис. 12,а) состоит из компенсирующего сильфона, который передает растягивающую нагрузку на образец и узла нагружения (см. рис. 12,б). Максимальное усилие, создаваемое нагружающим устройством, не менее 100 кг/мм<sup>2</sup> при толщине образца 200 мкм. При

изменении толщины образца можно менять только внешний узел нагружения, без потери точности определения нагрузки.



б

Рис. 12. Нагружающее устройство

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проектировании и обосновании работоспособности элементов конструкций атомных электростанций в первую очередь необходимо знать механические характеристики используемых конструкционных материалов, которые изменяются в процессе их эксплуатации. Для выяснения влияния газового (гелиевого, водородного) охрупчивания создана новая предобдирочная секция ПОС-4, позволяющая ускорять ионы гелия и протоны с токами 6,2 мА. Для имитации радиационной повреждаемости материалов рассчитана начальная часть ускорителя с  $A/q=15$  с КВЧ-фокусировкой, выходным током 5,2 мА. Это позволит в дальнейшем проводить исследования под двумя пучками, которые обеспечивают практически полную имитацию дефектообразования. Для проведения экспериментов под пучком разработано устройство для изучения механических свойств материалов при растяжении и камера для ионного облучения.

Работа выполнена в рамках проектов ЯМРТ гранта № X-5-533 и III-4-06 (ШЕНМП).

### ЛИТЕРАТУРА

1. И.М. Неклюдов. Состояние и проблемы атомной энергетики в Украине // *ВАНТ. Серия ФРП и РМ.* 2007, №2, с. 3-9.

2. И.М. Неклюдов. Современное состояние и перспективы развития атомной энергетики в Украине // *Энергетическая политика Украины.* Киев, 2006, с. 385-390.

3. В.Н. Воеводин, И.М. Неклюдов. Современный статус материалов ядерной энергетики - микроструктурная эволюция и радиационная стойкость // *Труды XVIII ICPRТ. Алушта, Крым, 8-13.09.2008,* с. 4-5.

4. D. Lesueur. Amorphisation par irradiation aux flagmats de fission dun alliage Pd-Si // *Radiat. Effects.* 1975, v. 24, № 2, p. 101-110; И.А. Баранов, С.О. Цепелевич, Ю.Н. Явлинский. Неупругое распыление твердых тел // *УФН.* 1988, т. 156, № 3, с. 477-510; И.А. Баранов, А.С. Кривоухатский, В.В. Обнорский. Механизм распыления материалов тяжелыми многозарядными ионами-осколками деления // *ЖТФ.* 1981, т. 51, № 12, с. 2457 – 2475.

5. В.Н. Воеводин, И.М. Неклюдов. *Эволюция структурно-фазового состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов.* Киев: «Наукова думка», 2006, с. 378.

6. Z.G. Wang et al. The sensitivity of metals under irradiation swift-heavy-ion irradiation: a transient thermal process // *J. Phys.: Condens. Matter.* 1994, v. 6, № 34, p. 6733-6750; M. Toulemonde. Nanometric phase transformation of oxide materials under GeV energy heavy ion irradiation // *Nucl. Instr. Meth. B.* 1999, v. 156, № 1-4, p. 1-11; R. Neumann. Scanning probe microscopy of ion-irradiated materials // *Nucl. Instr. Meth. B.* 1999, v. 151, № 1-4, p. 42-55; S. Furuno et al. Tracks of high energy heavy ions in solids // *Nucl. Instr. Meth. B.* 1996, v. 107, № 1-4, p. 223-226; S.A. Karamian, Yu.Ts. Oganessian, V.N. Bugrov. The effect of high-energy ions heavier than argon on a germanium single crystal and a new mechanism for autore-crystallisation // *Nucl. Instr. Meth. B.* 1989, v. 43, № 2, p. 153-158; А.Ю. Дидык. Радиационное воздействие тяжелых ионов на хромоникеливую сталь при высоких температурах // *Изв. РАН. Сер. «Металлы».* 1995, № 3, с. 128-135.

7. F. Ziegler, J. Biersack, U. Littmark. The Stopping Powers and Ranges of Ions in Matter // *Pergamon, N.Y.,* 1985, v. 1; L.C. Northclie, R.F. Shilling // *Nucl. Data Tables.* 1970, v. A7, № 3-4; I. Lindhard, M. Shar, H.E. Schiott // *Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk.* 1963, v. 33, № 14, p. 1-42.

8. В.А. Бомко, А.Ф. Кобец, С.С. Тишкин и др. Вариант переменного-фазовой фокусировки с шаговым изменением синхронной фазы // *ВАНТ. Серия ЯФИ.* 2004, №2, с. 153-155.

9. V.A. Bomko, Y.V. Ivakhno. A new technique of tuning interdigital accelerating structure of the ion linear accelerator // *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research.* 2007, v. A 582, p. 374-377.

10. V.A. Bomko, A.F. Dyachenko, B.V. Zajtsev, et al. Inductance-capacitor system for tuning of interdigital structure of the ion linear accelerator // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Nuclear Physics Investigations».* 2007, № 5, p. 180-183.

11. А. с. СССР № 265312. *Линейный ускоритель ионов* / В.В. Владимирский, И.М. Капчинский,

В.А. Тепляков // *Бюллетень ОИПТЗ*, 1970, № 10, с. 75.

12. С.С. Тишкин. Комбинированная фокусировка высокочастотным полем в линейных ускорителях ионов // *Вестник ХНУ им. В.Н. Каразина. Сер. физ. «Ядра, частицы, поля»*. 2008, №808, в. 2(38), с. 37-46.

13. M.L. Good. Phase-Reversal focusing in Linear Accelerators // *Phys.Rev.* 1953, № 2, p. 538-541.

14. Я.Б. Файнберг. Переменно-фазовая фокусировка в линейных ускорителях // *ЖТФ*. 1959, т.29, в. 5, с. 568-569.

15. В.Г. Папкович, Н.А. Хижняк, Н.Г. Шулика. Переменно-фазовая фокусировка в линейном ускорителе // *ВАНТ. Серия ТФЭ*. 1978, в. 2(2), с. 51-56.

16. С.С. Тишкин. Ускоряющий канал начальной части линейного ускорителя тяжелых ионов с комбинированной высокочастотной фокусировкой // *ВАНТ. Серия ПЭ и НМУ*. 2008. №4(6), с. 327-331.

17. В.А. Бомко, С.Н. Дубнюк, Б.В. Зайцев и др. Экспериментальный комплекс для изучения деформации материалов под пучком ионов азота // *ВАНТ. Серия ФРП и РМ*. 2008, № 2, с. 187-190.

18. В.А. Бомко, А.М. Егоров, Б.В. Зайцев и др. Развитие комплекса ЛУМЗИ для ядерно-физических исследований // *Problems of Atomic Science and Technology. Series NPhI*. 2008, № 3, p.100-104.

19. С.С. Тишкин, В.А. Бомко, С.Н. Дубнюк и др. ЛУМЗИ для радиационных исследований // *Труды ICPRP. Алушта, Крым, 8-13.09.2008*, с. 415-416.

*Статья поступила в редакцию 17.10.2008 г.*

## **РОЗВИТОК РАДІАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НА ЛУМЗІ**

***Б.В. Зайцев, В.О. Бомко, О.Ф. Дьяченко, А.П. Кобец, Ю.В. Мелешкова, Л.С. Ожигов, К.В. Павлій, О.О. Пархоменко, С.С. Тишкін***

Розглянуто питання про методичне забезпечення експериментальних робіт з радіаційного матеріалознавства на прискорювачі ЛУМЗІ. Для опромінення матеріалів протонами і іонами гелію створена нова початкова частина лінійного прискорювача важких іонів (ПОС-4). Для опромінення іонами важких металів (азоту, алюмінію, заліза, нікелю і т.д.) розрахований прискорююче-фокусуєчий тракт початкової частини ЛУМЗІ з комбінованим фокусуванням ВЧ-полем (ПОС-15). Розроблені та створені експериментальні пристрої для опромінення конструкційних матеріалів та вивчення механічних властивостей (повзучість, релаксація напруг, активне деформування, розмірна стабільність) під пучком іонів.

## **DEVELOPMENT OF RADIATING RESEARCHES ON MILAC**

***B.V. Zajtsev, V.A. Bomko, O.F. Dyachenko, A.F. Kobets, Yu.V. Meleshkova, L.S. Ozhigov, K.V. Pavlii, O.O. Parchomenko, S.S. Tishkin***

The question on methodical support of experimental works on radiating materiology on accelerator MILAC is considered. For an irradiation of materials protons and ions of helium create a new initial part of the linear accelerator of heavy ions (POS-4). For an irradiation by ions of heavy metals (nitrogen, aluminium, iron, nickel, etc.) it is calculated accelerating-focusing a fraction of initial part MILAC with the combined focusing by the RF-field (POS-15). Experimental devices for an irradiation of constructional materials and studying of mechanical properties (creep, a relaxation of pressure, active deformation, dimensional stability) under a bunch of ions are developed and created.