

РАЗВИТИЕ КОМПЛЕКСА «ЛУМЗИ» ДЛЯ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В.А. Бомко, А.М. Егоров, Б.В. Зайцев, А.Ф. Кобец, К.В. Павлий*
Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»
Харьков, Украина

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

Рассмотрен вопрос о развитии комплекса «ЛУМЗИ» для исследования в области радиационного материаловедения по изучению пластических характеристик конструкционных материалов под пучком ионов и после облучения, производству и исследованию трековых мембран, производству радионуклидов для медицинских целей, в области ядерной физики по изучению взаимодействия тяжелых ионов. Для этих целей разрабатываются и создаются новые ускоряющие структуры, которые обеспечивают проведение вышеперечисленных исследований.

ВВЕДЕНИЕ

Работы по изучению физических и технических проблем, связанные с разработкой и созданием линейных ускорителей, были начаты в Харьковском физико-техническом институте в конце 40-х годов. Коллективом сотрудников была впервые создана теория линейных ускорителей, физические основы динамики заряженных частиц были разработаны Я.Б. Файнбергом, Г.Я. Любарским и др. Наиболее весомым вкладом в ускорительную технику стал линейный ускоритель многозарядных ионов (ЛУМЗИ) на энергию порядка 8,5 МэВ/нуклон, разработка и создание которого началась в 1953 году. В 1958 году этот ускоритель вступил в строй, на нем был получен пучок ионов N^{3+} с интенсивностью 10^5 част./с, в таком режиме ускоритель работал до 1963 г. В дальнейшем было выполнено несколько реконструкций ЛУМЗИ, в результате которых были получены токи пучка ионов азота 50 мкА ($2 \cdot 10^{10}$) и аргона 6 мкА ($2 \cdot 10^9$).

В настоящее время в ННЦ ХФТИ накоплен большой опыт разработки, сооружения и эксплуатации линейных ускорителей тяжелых ионов. На ЛУМЗИ, который ускоряет ионы довольно широкого диапазона масс до энергии 8,5 МэВ/нуклон, ведутся работы по совершенствованию ускоряющих структур, разработке, исследованию и внедрению новых перспективных методов ускорения, разрабатываются новые прикладные и фундаментальные направления для ядерно-физических исследований.

1. РАДИАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работоспособность конструкций активной зоны АЭС в основном определяется пластическими характеристиками используемых материалов. Используя ускоренные заряженные частицы можно полностью моделировать процессы, происходящие при радиационном воздействии в активных зонах реакторов при стационарных и переходных режимах эксплуатации. Поэтому, изучение воздействия заряженных частиц на конструкционные материалы [1] является актуальным. Для технологических целей требуется более углубленное знание радиационных процессов не только после облучения материалов,

но и в процессе их облучения, особое внимание следует уделять газовому внедрению [2].

Для изучения пластических свойств конструкционных материалов разрабатываются методики и комплекс экспериментальных средств, который позволит проводить облучения под пучками ионов азота, гелия и т.д. После облучения будет изучаться микроструктура и механические свойства образцов в зависимости от различных набранных доз, температуры, плотности ионного потока, времени релаксации (выдержка образцов после облучения) и других параметров.

На Рис.1 представлена камера для облучения образцов на ЛУМЗИ. В держателе располагаются четыре образца на барабане, которые можно последовательно облучать без извлечения их из камеры.

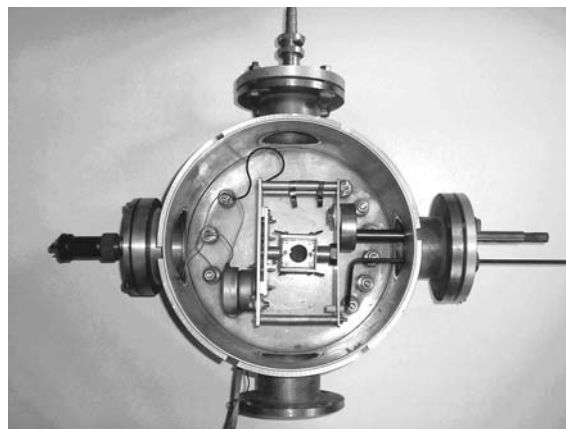


Рис.1. Камера с держателем образцов для облучения материалов

Для активного облучения конструкционных материалов разработано устройство, позволяющее под пучком ионов изучать пластические характеристики, такие как ползучесть, релаксацию напряжений, активное деформирование при растяжении и размерную стабильность. Схема этого устройства показана на Рис.2. Устройство состоит: 1 – индукционный датчик деформации, точность измерения деформации 1 мкм; 2 – шток датчика деформации, передает перемещение нагружающего устройства 6 на датчик деформации; 3 – нагревательный элемент, позволяет поддерживать температуру образца при

облучении до 800 °С; 4 – испытуемый образец, общий вид которого с захватами для растяжения приведен на Рис.3; 5 – нагружающий шток, который обеспечивает передачу нагрузки на образец от сменного пневматического нагружающего устройства 6. В зависимости от сечения образца можно менять нагружающее устройство, тем самым менять предельные нагрузки на исследуемый образец.

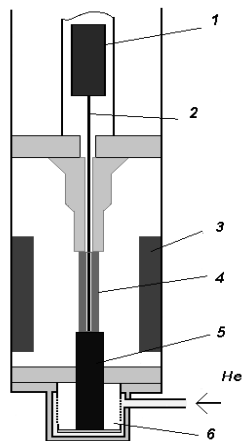


Рис.2. Схема экспериментального устройства для изучения пластических свойств материалов под пучком ионов

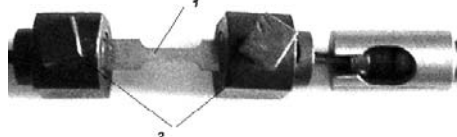


Рис.3. Исследуемый образец с захватами. 1 – образец, 2 – захваты

Разработанные устройства для изучения пластических характеристик конструкционных материалов позволяют облучать материалы (Рис.1) при различных плотностях потоков ионов до разных доз и изучать ползучесть, релаксацию напряжения, активное деформирование и размерную стабильность (не нагруженный образец) как в процессе ионного облучения (см. Рис.2), так и после него.

2. ТРЕКОВЫЕ МЕМБРАНЫ

Трековые мембраны получают путём облучения полимерной монолитной пленки ускоренными тяжелыми ионами с последующей физико-химической обработкой для формирования заданных пор. Для получения пор малого диаметра и цилиндрической формы необходимо, чтобы скорость травления вдоль треков была намного выше скорости травления неповрежденного полимера. Это достигается за счет увеличения атомного номера и энергии облучаемых ионов и зависит от условий дальнейшей физико-химической обработки облученной пленки на стадиях сенсибилизации и травления треков. Трековые мембраны характеризуются высокой селективностью в процессе фильтрации, биологической инертностью, радиационной безопасностью, ровной поверхностью плёнки и гладкими краями пор, низким уровнем дефектности, малой дисперсией диаметров пор (Рис.4). Используя такие свойства, трековые мембраны применяются при микрофильтрации жидких и газовых сред, при производстве изде-

лий микроэлектроники, для стерилизации от микрофлоры и др. В настоящее время на ЛУМЗИ проводятся экспериментальные исследования по облучению пучками тяжелых ионов полимерной пленки для получения трековых мембран.

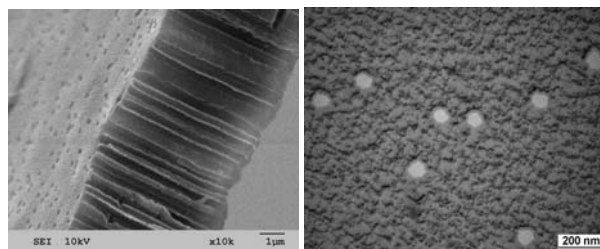


Рис.4. Поверхность и торцевой срез трековой мембраны под электронным микроскопом

В предобдирочной секции ускорителя ЛУМЗИ ускоряются трехзарядные ионы аргона (Ar_{40}^{+3}), однозарядные ионы азота (N_{14}^{+1}) до энергии 1 МэВ/н с интенсивностью $10^9 \dots 10^{10}$ част./с. Облучение полиэтилентерефталатовой (ПЭТФ) пленки толщиной 6...10 мкм и ее последующая физико-химическая обработка позволяют получать образцы трековых мембран со сквозными порами диаметром от 2 до 0,05 мкм. Для обеспечения равномерного распределения треков в полимерной пленке с заданной плотностью и направленностью разработана система ионного облучения со сканированием пучка в горизонтальной плоскости, с частотой до 20 кГц и величиной синусоидального напряжения до 20 кВ (Рис.5). Ионопровод представляет собой вакуумную камеру переменного сечения длиной 8 м с системой высоковакуумной откачки из трех паромасляных диффузионных агрегатов со скоростью откачки 3000 л/с.

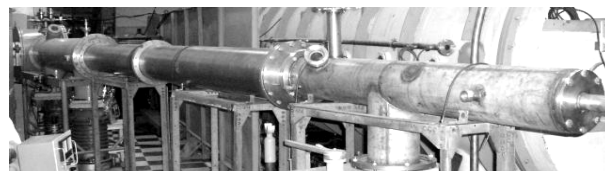


Рис.5. Система ионного облучения с ионопроводом переменного сечения

Общий вид камеры для облучения полимерных пленок с лентопротяжным механизмом магнитного типа приведен на Рис.6, скорость подачи пленки составляет 1...5 м/мин.

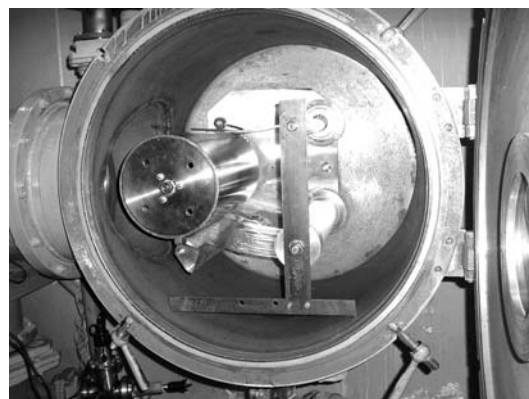


Рис.6. Камера ионного облучения с лентопротяжным механизмом

При создании трековых мембран с ультрамалыми порами наиболее часто используются ускоренные тяжелые ионы типа ксенона Xe , которые создают в треках достаточную дефектность для того, чтобы скорость травления вдоль треков – vl , т.е. линейная скорость была гораздо больше радиальной скорости травления – vr . При $vl \gg vr$ удается получать сквозные поры диаметром ≥ 10 нм. Считается, что облучением более легкими ионами (типа ионов Ar) невозможно получить в ПЭТФ пленках сквозные поры диаметром $< 0,1$ мкм. Однако выполненные нами исследования показали, что выбор определенных условий сенсбилизации позволяет заметно увеличить линейную скорость травления треков ионов аргона Ar в ПЭТФ пленках и получить сквозные поры диаметром 50 нм (Рис.4). Использовалась комбинированная сенсбилизация облучением пленок ультрафиолетом с последующей выдержкой в диметилформамиде.

Исследованы способы получения полимерных мембран с бактерицидными и бактериостатическими свойствами. Разработана методика иммобилизации хитозана на поверхности трековых ПЭТФ мембран. В результате исследований получены ПЭТФ мембраны, которые имеют стабильные во времени бактериостатические свойства. Однако необходимый диаметр и форма пор трековой мембраны получается тем легче, чем выше атомный номер ускоренных ионов, которыми была облучена полимерная плёнка. Поэтому для увеличения массы и интенсивности, ускоренных до 1 МэВ/нуклон ионов, разрабатываются новые предобдирочные секция ускорителя ЛУМЗИ.

3. ПРОИЗВОДСТВО РАДИОНУКЛИДОВ

Областью массового использования радионуклидов является медицина. Наиболее широкое применение ультракороткоживущие (УКЖ) радионуклиды получили ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O и ^{18}F , с помощью которых исследуют метаболические процессы, диагностируют заболевание сердца, головного мозга и т.д. ^{18}F – относительно долгоживущий изотоп ($T_{1/2} = 109,7$ мин), хорошо изучены ядерные реакции, в которых ^{18}F образуется прямым или косвенным путем (Таблица 1).

Таблица 1.

Ядерные реакции	Доля ядер миш.	-Q, МэВ	E_0 , МэВ	E , МэВ
Прямые реакции				
$^{18}O(p, n)$	0,2	-2,43	15	5,2
$^{20}Ne(d, ^4He)$	90,51	2,79	76	<25
$^{16}O(^4He, pn)$	99,76	18,5	40	36
$^{16}O(^3He, p)$	99,76	-2,03	20	8
Косвенные реакции: $^{18}Ne \xrightarrow{1,67c} ^{18}F$ β^+				
$^{20}Ne(^3He, ^4He, n)$	90,51	15,52	31	30,9
$^{16}O(^4He, 2n)$	99,76	15,5	40	
$^{16}O(^3He, n)$	99,76	3,20	36	
$^{20}Ne(d, p 3n)$	90,51	30,73	76	57,5

Так как изотоп ^{18}F является наиболее широко используемым для ПЭТ-томографии, то производство ^{18}F (около 1 кюри в час) на линейном ускорителе ионов возможно реализовать с помощью реакций $^{18}O(p, n)^{18}F$ и $^{16}O(\alpha, pn)^{18}F$ с энергиями 8,5 и 34 МэВ для протонов и ионов гелия, соответственно. При этом большое внимание следует уделять определению сечений реакции с выбором облучаемых образцов. На Рис.7 приведены сечения реакций для $^{18}O(p, n)^{18}F$ и $^{16}O(\alpha, pn)^{18}F$, взятые из работ [3].

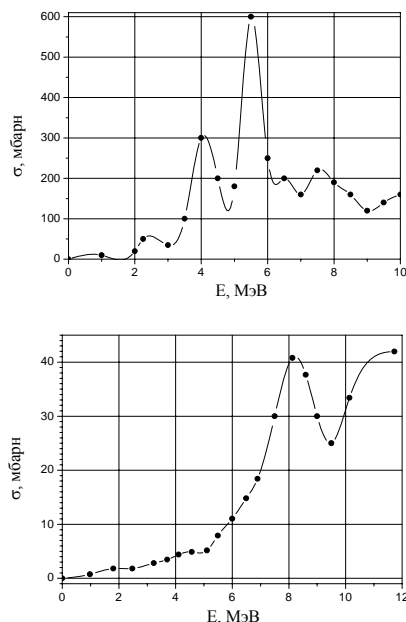


Рис.7. Зависимость сечения реакции $^{18}O(p, n)^{18}F$ и $^{16}O(\alpha, pn)^{18}F$ от энергии

Для наработки радионуклидов ^{18}F были изготовлены мишени из CeO_2 , спрессованные в виде таблеток диаметром 2 см и толщиной около 2 мм. Исследуемые мишени выдерживали токи протонов с энергией 3МэВ до (10...15) мкА и токи ионов гелия с энергией 8МэВ до (1...5) мкА. Для наработки радионуклидов на ЛУМЗИ была использована мишенная камера, общий вид которой представлен на Рис.1, в которой крепилось четыре образца из CeO_2 . Для наработки необходимого количества ^{18}F на ЛУМЗИ создана новая предобдирочная секция ПОС-4.

4. ЯДЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В начале 70-х годов возникла идея «холодного» синтеза сверхтяжелых элементов (СТЭ). Этими работами в основном занимаются три лаборатории: Беркли (США), GSI в Дармштадте (Германия) и ОИЯИ в Дубне (Россия). На сегодняшний день получены следующие СТЭ (Табл.2) вблизи острова стабильности. Однако пока не обнаружено прямых реакций для получения стабильных СТЭ, например, для получения стабильного изотопа 114-го элемента с атомным номером 298 – не хватает нейтронов. Для получения СТЭ используют реакции на пучках тяжелых ионов, например ^{238}U , ^{48}Ca и др. Теоретическому изучению динамики ядерных реакций при слиянии, в концепции двойной ядерной системы

(ДЯС) [4], посвящено ряд работ [5]. Процесс слияния ядер определяется потенциальной энергией ДЯС, то есть $U_{CN} = V_{CN} + B_1 + B_2 - B_{CN}$ [4, 5], где B_1 , B_2 , B_{CN} – энергии связи ядер ДЯС и составного ядра соответственно, V_{CN} – ядро-ядерный потенциал. Ядро-ядерный потенциал включает в себя кулоновский, центробежный и ядерный потенциалы – $V_{CN} = V_C + V_{rot} + V_N$. Из анализа динамики ядерных реакций следует, что при образовании потенциального «кармана» при взаимодействии двух фрагментов можно ожидать слияние этих ядер при соответствующих условиях. На Рис.8 приведена зависимость глубины потенциального кармана от заряда мишени для реакций – $Cm_{96}^{248} + A_1$, где A_1 – мишень, при эмиссии нейтронов от 0 до 10.

Таблица 2.

Изотоп	E_α (МэВ)	Период полураспада ($T_{1/2}$)
$^{286}_{114}$	-	100 мс
$^{287}_{114}$	10,29	5 с
$^{288}_{114}$	9,83	2,6 с
$^{289}_{114}$	9,71	21 с
$^{287}_{115}$	$10,59 \pm 0,09$	32 мс
$^{288}_{115}$	$10,46 \pm 0,06$	87 мс
$^{290}_{116}$	10,86	29 мс
$^{292}_{116}$	10,56	52,5 мс
$^{294}_{118}$	11,81	1,8 мс

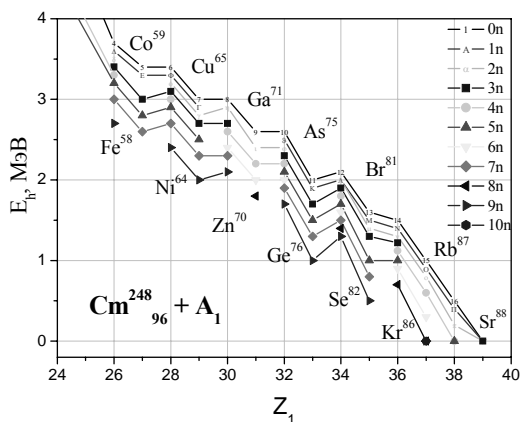


Рис.8. Зависимость глубины потенциального кармана от заряда мишени

Такие же зависимости получены и для реакций с ^{238}U и ^{244}Pu . Отсюда следует, что для возможного протекания реакций слияния, следует подобрать энергию снаряда такую, чтобы по компоненте R система была стабильной, то есть находилась в энергетическом равновесии. Как показали проведенные расчеты, для этого минимальная кинетическая энергия пучка должна находиться в диапазоне 0,6...1,5 МэВ/нукл. в зависимости от массы снаряда и мишени (Рис.9), а максимальная энергия на 15...30% больше минимальной энергии.

Однако, эволюция ДЯС происходит не только по компоненте R – расстоянию между фрагментами ДЯС, но и по компонентам: A – массовому числу и Z – количеству протонов во фрагментах. Это обстоятельство является определяющим при планировании

и проведении экспериментальных работ, так как кроме нехватки нейтронов вероятность такого процесса является чрезвычайно малым ($< 10^{-14}$ барн). Для этой цели используют нейтроноизбыточные или радиоактивные ядра. Например, при реакции деления обнаружили изотопы ^{78}Ni . Проведенные расчеты показали, что возможно протекание реакции $^{238}U + ^{78}Ni \rightarrow ^{316-x}120 + xn \rightarrow ^{312-x}118 \rightarrow ^{308-x}116 \rightarrow ^{304-x}114$. Однако, образование нейтроноизбыточных ядер и само сечение реакции слияния чрезвычайно малы.

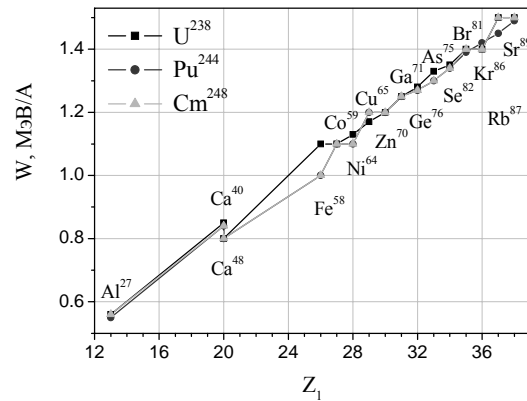


Рис.9. Зависимость минимальной энергии пучка от количества протонов мишени

Поэтому, кроме правильного выбора, для проведения экспериментальных работ пар ядро-мишень, необходимо проводить теоретические исследования при взаимодействии ионов с возбужденными ядрами, например, при возбуждении их вторым ионным пучком или нейтронами. Кроме этого, необходимо учитывать динамику нуклонов в ДЯС, эмиссию частиц, деформацию фрагментов ДЯС и т.д. После проведения теоретических работ планируется создание предобдирочной секции для экспериментального исследования процессов слияния-квазиделения сверхтяжелых ядер.

5. КОМПЛЕКС «ЛУМЗИ» ДЛЯ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные работы по радиационному материаловедению, получению и исследованию трековых мембран, производству радионуклидов и изучению процессов слияния СТЭ проводятся на Харьковском ускорителе тяжелых ионов ЛУМЗИ [6], общий вид которого представлен на Рис.10.

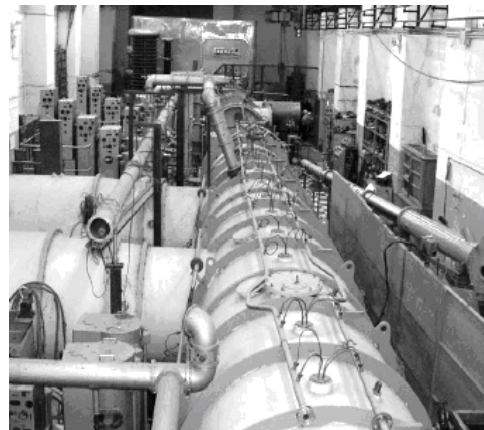


Рис.10. Общий вид ЛУМЗИ

В комплексе ЛУМЗИ на сегодняшний день имеются две предобдирочные секции (Рис.11) с $A/q = 15$ и новая секция для ускорения ионов гелия с $A/q = 4$ (ПОС-4) (Рис.12) в которых происходит ускорение ионов до энергии 1 МэВ/нуклон. После этого осуществляется переход в основную секцию с $A/q = 5$, которая позволяет ускорять ионы до энергий 8,5 МэВ/нуклон.

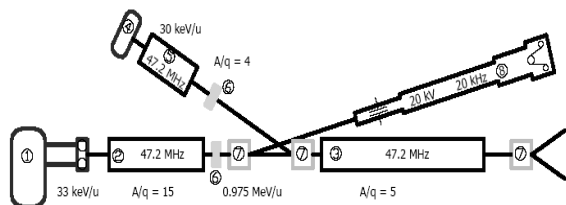


Рис.11. Структурная схема комплекса ЛУМЗИ



Рис.12. Предускорительная секция ПОС-4

Разрабатывается предобдирочная секция для частиц с $A/q \leq 14$, темпом ускорения свыше 2 МэВ/м и выходной энергией 1 МэВ/нуклон и с $A/q \leq 20$. Готовятся входные данные для разработки ускорительной секции тяжелых ионов с $A/q \leq 65$ для изучения процессов слияния и деления тяжелых ядер.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. Lesueur. Amorphisation par irradiation aux flagmats de fission d'un alliage Pd-Si // *Radiat. Effects*. 1975, v.24, №2, p.101-110; И.А. Баранов, С.О. Цепелевич, Ю.Н. Явлинский. Неупругое распы-

ление твердых тел // *УФН*. 1988, т.156. №3, с.477-510; И.А. Баранов, А.С. Кривохатский, В.В. Обнорский. Механизм распыления материалов тяжелыми многозарядными ионами – осколками деления // *ЖТФ*. 1981, т.51, №12, с.2457-2475.

2. E.A. Gulbransen, K.F. Andrew // *Trans. AIME*. 1950, v.188, p.586; K. Osthagen, P. Kofstad // *J. Less Common Metals*. 1963, v.5, №1, p.7; А.В. Бялбжецкий, М.С. Цирлин, Б.И. Красилов. *Высокотемпературная коррозия и защита сверхуглепластиков металлов*. М.: «Атомиздат», 1977; L.E. Irod. *Transition metal carbides and nitrides*. New York: Academic, 1971.
3. П.П. Дмитриев. *Выход радионуклидов в реакциях с протонами, дейтронами, альфа-частицами, гелием-3* / Справочник, М.: «Энергоатомиздат», 1986, 272 с; В.W. Wieland, С.W. Alvord, G.T. Bida, G.O. Hendry, J.-L. Morelle. New Liquid Target Systems for the Production of [Fluorine-18] Fluoride Ion and [Nitrogen-13] Ammonium Ion with 11 MeV Protons // *TARGETRY '91, Proceedings of the IVth International Workshop on Targetry and Target Chemistry, PSI Villigen, Switzerland*. 1991.
4. В.В. Волков // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. 2004, т.35, Вып.4; В.В. Волков // *Изв. АН СССР. Сер. Физ.* 1986, т.50, с.1879; N.V. Antonenko, E.A. Cherepanov A.K., Nasirov, et al. // *Phys. Lett. B*. 1993, v.319, p.425; *Phys. Rev. C*. 1995, v.51, p.2635.
5. G.G. Adamian, N.V. Antonenko, W. Scheid // *Nucl. Phys. A*. 2000, v.678, p.24; E.A. Cherepanov, V.V. Volkov, N.V. Antonenko, et al. // *Nucl. Phys. A*. 1995. v.583. p.165c; G.G. Adamian, N.V. Antonenko, W. Scheid, V.V. Volkov // *Nucl. Phys. A*. 1998. v.633. p.409; E.A. Cherepanov // *Pramana J. Phys.* 1999. v.53. p.619.
6. V.A. Bomko, S.A. Borsuk, A.F. Dyachenko, et al. // *Tuning the Cells of the Accelerating Structure with RF Quadrupole Doublets* // *Proc. of RuPAC XIX, Dubna*. 2004, p.321-323.

DEVELOPMENT OF THE "MILAC" COMPLEX FOR NUCLEAR PHYSICAL INVESTIGATIONS

V.A. Bomko, A.M. Yegorov, B.V. Zaytsev, A.F. Kobets, K.V. Pavlii

A question is considered about development of complex «LUMZI» for research in area of radiation materials science on the study of plastic descriptions of construction materials under the bunch of ions and after an irradiation, to the production of track membranes for making of hyperfine filters, to the production of radioactive nuclides for medical aims, in area of nuclear physics on the study of co-operation of heavy ions. For these aims developed and created new accelerating structure, which provide conducting of the above-stated researches.

РОЗВИТОК КОМПЛЕКСУ «ЛУМЗИ» ДЛЯ ЯДЕРНО-ФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В.О. Бомко, О.М. Єгоров, Б.В. Зайцев, А.П. Кобець, К.В. Павлій

Розглянуто питання про розвиток комплексу «ЛУМЗИ» для дослідження в області радіаційного матеріалознавства по вивченню пластичних характеристик конструкційних матеріалів під пучком іонів і після опромінювання, виробництву і дослідженню треків мембран, виробництву радіонуклідів для медичних цілей, в області ядерної фізики по вивченню взаємодії важких іонів. Для цих цілей розробляються і створюються нові прискорюючі структури, які забезпечують проведення вищеперелічених досліджень.