

Вестник НЯЦ РК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Издается с января 2000 г.

ВЫПУСК 4 «ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА И РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ», ДЕКАБРЬ 2002

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР – к.т.н. ТУХВАТУЛИН Ш.Т.

НАУЧНЫЕ РЕДАКТОРЫ ВЫПУСКА – д.ф.-м.н. ЖОТАБАЕВ Ж.Р., д.ф.-м.н. КАДЫРЖАНОВ К.К.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: д.т.н. АРЗУМАНОВ А.А., д.г.-м.н. БЕЛЯШОВ Д.Н.,
БЕЛЯШОВА Н.Н., к.т.н. ГИЛЬМАНОВ Д.Г., д.г.-м.н. ЕРГАЛИЕВ Г.Х., КОНОВАЛОВ В.Е.,
д.ф.-м.н. КОСЯК Ю.Г., д.ф.-м.н. МИХАЙЛОВА Н.Н., к.ф.-м.н. МУКУШЕВА М.К., д.б.н. ПАНИН М.С.,
ПИВОВАРОВ О.С., ПТИЦКАЯ Л.Д., д.б.н. СЕЙСЕБАЕВ А.Т., к.ф.-м.н. СОЛОДУХИН В.П.,
д.ф.-м.н. ТАКИБАЕВ Ж.С., д.ф.-м.н. ТАКИБАЕВ Н.Ж.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ АТОМ ЭНЕРГЕТИКАСЫ

«ЯДРОЛЫҚ ФИЗИКА ЖӘНЕ РАДИАЦИЯЛЫҚ МАТЕРИАЛТАНУ»

4 ШЫҒАРЫМ, ЖЕЛТОҚСАН, 2002 ЖЫЛ

NYC IRK Bulletin

«NUCLEAR PHYSICS AND RADIATION MATERIAL STRUCTURE STUDY»

ISSUE 4, DECEMBER 2002

СОДЕРЖАНИЕ

СВОЙСТВА ВОЗБУЖДЕННЫХ РЕЗОНАНСНЫХ СОСТОЯНИЙ СОСТАВНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ КАНАЛИРОВАНИИ ИХ В КРИСТАЛЛАХ	5
Такибаев Н.Ж., Красовицкий П.М.	
РАЗВИТИЕ ПРЕЦИЗИОННОЙ СЕЛЕКТИВНОЙ ПО ГЛУБИНЕ МЕССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ НА ЭЛЕКТРОННОМ ИЗЛУЧЕНИИ	13
Алдияров Н.У., Жданов В.С., Кадыржанов К.К., Рыжих В.Ю., Якушев Е.М.	
ИЗУЧЕНИЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ d-α СИСТЕМЫ	20
Ленник С.Г., Ливенцова А.С., Такибаев Н.Ж.	
ИОННО-ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЕРИЛЛИЕВОЙ И БЕРИЛЛИЙСОДЕРЖАЩЕЙ ФОЛЬГИ	26
Тулеушев А.Ж., Лисицын В.Н., Володин В.Н., Тулеушев Ю.Ж.	
ПОЛЗУЧЕСТЬ СТАЛИ 12X18H10T ПОСЛЕ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ.....	32
Чумаков Е.В.	
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ $^{14}\text{N}(\text{p},\gamma)^{15}\text{O}$ ПРИ СВЕРХНИХНИХ ЭНЕРГИЯХ.....	36
Буртебаев Н., Сагиндыков Ш.Ш., Зазулин Д.М., Басыбеков К.Б., Бурминский В.П., Джазаиров-Кахраманов В.Дж., Зарифов Р.А., Тохтаров Р.Н.	
ТЕНДЕНЦИИ ИНТЕГРАЦИИ И ПОТЕНЦИАЛ СЕВЕРА РОССИИ В ПРОБЛЕМЕ ИЗОЛЯЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ.....	41
Комлев В.Н., Бичук Н.И., Зайцев В.Г., Мелихова Г.С., Павлов В.А.	
ПОСЛЕРЕАКТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЭЛОВ, ОБЛУЧЕННЫХ В АЗОТООХЛАЖДАЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КАНАЛАХ КЭТ	58
Дерявко И.И., Колодешников А.А., Перепелкин И.Г., Пивоваров О.С., Стороженко А.Н.	
СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В МЕТАЛЛАХ С ОЦК-СТРУКТУРОЙ ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ	62
Абылкалыкова Р.Б., Скаков М.К.	
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ СТРУКТУР И СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ СПЛАВА НА Ni-Cr ОСНОВЕ	66
Ерболатулы Д., Скаков М.К., Алонцева Д.Л., Гребнева В.С.	
ИЗУЧЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ ИЗ КАРБИДОВ НИОБИЯ И ТАНТАЛА, НАНЕСЕННЫХ НА ПОВЕРХНОСТЬ ГРАФИТОВОГО ТИГЛЯ, В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ПЛАВЛЕНИЮ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ	69
Жданов В.С., Шаповалов Г.В., Окапбаев Р.А., Скаков М.К., Уткелбаев Б.Д., Коянбаев Е.Т.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ЗАТВЕРДЕВШЕГО РАСПЛАВА ТОПЛИВНОЙ СМЕСИ ПОСЛЕ ЕГО ПОВТОРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ.....	74
Васильев Ю.С., Уткелбаев Б.Д., Коянбаев Е.Т., Окапбаев Р.А.	
ПИСЬМО В РЕДАКЦИЮ.....	78

УДК 539.141/142

СВОЙСТВА ВОЗБУЖДЕННЫХ РЕЗОНАНСНЫХ СОСТОЯНИЙ СОСТАВНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ КАНАЛИРОВАНИИ ИХ В КРИСТАЛЛАХ

Такибаев Н.Ж., Красовицкий П.М.

Институт ядерной физики ИЯЦ РК

Даны некоторые результаты по компьютерному моделированию явлений резонансного возбуждения сложных частиц при каналировании их в кристаллах. С целью проверки дано сравнение результатов компьютерного моделирования и решений первого приближения; представлены две основные поправки, соответствующие реальным процессам каналирования: уменьшение скорости вследствие потери энергии и учет тепловых колебаний кристаллической решетки.

В последнее время в связи с развитием науки и техники возникает много новых и актуальных задач. Такая ситуация встречается в хорошо изученных явлениях и задачах, а чаще на стыке двух или более областей, где обнаруживаются новые и неожиданные эффекты. Поэтому можно считать необходимым исследование в знакомых и развивающихся областях с новых позиций.

Каналирование [1,2] – явление прохождения ускоренных частиц сквозь кристалл, когда скорость частицы велика и параллельна оси кристалла. Этот процесс характеризуется малыми потерями энергии теми частицами, которые попадают в достаточно узкую область между плоскостями кристаллической решетки. В работах по каналированию затрагиваются вопросы, касающиеся таких тем, как каналирование разных типов частиц (различные массы, заряды – положительные и отрицательные) [3,4,5], различные типы каналирования (плоскостное и аксиальное) [6,7], предельные параметры каналирования (предельные углы, возможность квазиканалирования и др.) [8], характер поперечного движения и связанные с ним эффекты [9,10], изменение продольной скорости (торможение) [11,3], фокусировка пучка при каналировании и изменение направления пучка [4,12] (каналирование в изогнутом кристалле). В ряду уже проделанного в этой области (указанного выше) видится еще один аспект, связанный с темой нашей работы [13].

Явление возбуждения сложных частиц, каналированных сквозь кристалл заслуживает интереса как с точки зрения научной значимости (ибо соединяет в себе различные разделы физики: квантовую механику, физику кристаллов, физику резонансных явлений и т. д.), так и с практической стороны (учет возможных влияний в процессе каналирования на сложные частицы, как полезных, так и вредных; способ получения экзотических пучков для увеличения возможных вариантов проведения существующих реакций и т. п.).

Решение поставленной перед нами задачи проводится в рамках метода воздействия на квантовую систему внешнего, зависящего от времени возмущения. Поэтому за исходную систему координат вы-

бирается система, связанная с движущейся частицей. Потенциал взаимодействия частицы с кристаллом представляется как периодическая функция от времени [14].

Рассматривается квантовая система, на которую действует внешняя сила, зависящая от времени [15]. Предположим, что эта система в свободном состоянии (без действия на неё внешних сил) описывается набором известных волновых функций. В случае резонансного совпадения частот внешней силы и внутренних состояний коэффициенты при состояниях, связанных резонансной частотой, подчиняются уравнению,

$$\begin{cases} i \frac{da_m}{dt} = \bar{V}_{mn} a_n e^{i\omega_{mn}t} \\ i \frac{da_n}{dt} = \bar{V}_{mn} a_m e^{-i\omega_{mn}t} \end{cases} \quad (1a)$$

с начальными условиями

$$a_n(t=0) = 0$$

$$a_m(t=0) = 1$$

или в виде одного уравнения 2-го порядка

$$\frac{d^2 a_n}{dt^2} - (i \cdot \omega + \frac{\bar{V}_{mn}}{V_{mn}}) \frac{da_n}{dt} + \bar{V}_{mn}^2 a_n = 0. \quad (16)$$

где

$$V_{mn}(t) = \langle \Psi_m | V | \Psi_n \rangle.$$

Определим периодический потенциал $V(t)$ в задаче прохождения заряженной частицы вдоль упорядоченной системы зарядов. Таким образом, мы моделируем пролет ускоренной частицы параллельно оси кристалла. Для простоты и определенности рассмотрим движение частицы в идеальном кристалле кубической структуры с абсолютно идентичными между собой атомами, и начнем с одномерного случая.

Полный потенциал взаимодействия частицы, находящейся в точке R_q :

$$V_G(\vec{R}_q) = \sum V_i(R_q),$$

где V_i есть потенциал взаимодействия этой частицы с i -м атомом решетки.

Из условия задачи ($\vec{r} \uparrow \uparrow \vec{d}$, идентичность узлов) очевидно, что потенциал является периодической функцией

$$V_G(\vec{R}_*) = V_G(\vec{R}_* + \vec{d}). \quad (2)$$

Потенциал взаимодействия каналируемой частицы с i -м атомом кристаллической структуры зависит только от относительного расстояния между ними:

$$V_i(\vec{R}_*) = V(\vec{R}_* - \vec{R}_i) \\ \vec{R}_i = \vec{R}_0 + i\vec{d},$$

где R_0 - координата некого атома, произвольно выбранного за нулевой. В некоторый момент времени $t=0$ выберем этот атом как ближайший к каналируемой частице. В данном приближении

$$\vec{R}_* - \vec{R}_0 = \vec{R}.$$

Тогда общий потенциал может быть представлен в виде:

$$V_G(\vec{R}_*) = V(\vec{R}) + V(\vec{R} + \vec{d}) + \\ + V(\vec{R} + 2 \cdot \vec{d}) + \dots + V(\vec{R} - \vec{d}) + \dots = V(\vec{R}). \quad (3)$$

$\vec{R}$ может быть записано в виде:

$$\vec{R} = v\vec{t} + \vec{\rho} + \vec{r}, \quad (4)$$

где $\vec{r}$ есть координаты той части частицы, которая и является взаимодействующей с атомами кристаллической решетки (предполагается, для простоты, что такая часть всего одна).

Условие периодичности (2) можно переписать в виде:

$$V_G(\vec{R}(t, \vec{r})) = V_G(t, \vec{r}) = V_G(t + T, \vec{r}), \quad (5)$$

$$T = \frac{d}{v}. \quad (6)$$

Потенциал (3) с R из (4) является периодической функцией, что однако, выражено неявно. Следовательно, работать с таким потенциалом в дальнейшем не очень удобно. Поэтому, предлагаем здесь два способа выражения явной периодичности:

1. Требуемый потенциал задается равным потенциалу (3),(4) на интервале

$$t = \left[-\frac{d}{2v}, \frac{d}{2v} \right],$$

на остальном промежутке времени он задается соотношениями (5),(6). Использование такого потенциала возможно с помощью разложения на указанном отрезке в гармонический или другие ряды.

2. В формулах (3),(4) время t заменяется на периодическую функцию, зависящую от времени, с периодом (6):

$$t \rightarrow F_{\text{ид}}(2\pi \cdot t / T),$$

такой вид потенциала удобен при численных расчетах.

При вычислении матричных элементов V_{12} в задаче каналирования сложной частицы сквозь кристалл допустимы следующее предположение: внутренние линейные характеристики частицы определяются действующими внутри силами. Если эти силы имеют ядерную структуру, то соответствующие расстояния будут иметь порядок fm. Расстояние между частицей и кристаллом определяется

параметрами кристалла и имеет порядок $\overset{0}{A}$. Потенциал, входящий в матричный элемент, зависит от векторной суммы этих величин, причем только от модуля:

$$V = V(R^*) = V\left(\left|\vec{R} + \vec{r}\right|\right).$$

Поэтому допустимо следующее разложение:

$$V(\vec{r}) = V(0) + \frac{\partial V}{\partial r_i} \Big|_{r_i=0} r_i + \dots$$

Если угловая часть волновых функций состояний 1 и 2 записана через сферические функции (а в подавляющем большинстве случаев это можно сделать), матричные элементы будут равны:

$$V_{12} = \int \phi_1(r) Y_{l_1 m_1}(\theta, \varphi) V(\vec{r} + \vec{R}) \phi_2(r) \times \\ \times Y_{l_2 m_2}(\theta, \varphi) d\vec{r} = \frac{\partial V(R)}{\partial R} A_{12} B_{l_1 l_2 m_1 m_2}(\varphi_R, \theta_R), \quad (7)$$

где

$$A_{12} = \int_0^\infty \phi_1(r) \phi_2(r) r^3 dr,$$

$$B_{l_1 l_2 m_1 m_2} = \frac{i(-1)^{m_1} \delta_{l_1 l_2+1} \sin \theta_r}{\sqrt{(2l_2+1)(2l_2+3)}} \times \\ \times \left\{ \sin \theta_r \left(e^{-i\varphi_R} \delta_{m_2 m_1-1} \sqrt{(l_2+m_1)(l_2+m_1+1)} - \right. \right. \\ \left. \left. - (-1)^{2l_2} e^{i\varphi_R} \delta_{m_2 m_1+1} \sqrt{(l_2-m_1)(l_2-m_1+1)} \right) + \right. \\ \left. + \cos \theta_r \delta_{m_1 m_2} \sqrt{2(l_2+m_1+1)(l_2-m_1+1)} \right\}$$

или сокращенно:

$$B_{l_1 l_2 m_1 m_2} = (B_1 e^{-i\varphi_R} + B_2 e^{i\varphi_R}) \sin \theta_R + B_3 \cos \theta_R = \\ = (\hat{B}_1^0 \cos \varphi_R + \hat{B}_2^0 \sin \varphi_R) \sin \theta_R + \hat{B}_3^0 \cos \theta_R$$

Таким образом, матричный элемент будет равен:

$$V_{12} = A_{12} \frac{dV}{dR} \left\{ \hat{B}_1^0 \frac{R_x}{R} + \hat{B}_2^0 \frac{R_y}{R} + \hat{B}_3^0 \frac{R_z}{R} \right\} \quad (8).$$

При этом на самом деле этот матричный элемент- половина, вторая половина получается взаимной заменой (l_1, m_1) на (l_2, m_2) . Временно не будем это учитывать, так как возможен только один из этих случаев (либо $l_1=l_2+1$, либо наоборот).

При использовании приближения, когда потенциал считается гармонической функцией:

$$\psi(t) = V_k e^{i\omega t} + V_k^* e^{-i\omega t},$$

где

$$V_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} V(t) \exp\left(-\frac{2\pi i k t}{T}\right) dt, V_k^* = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} V(t) \exp\left(\frac{2\pi i k t}{T}\right) dt$$

получим выражение для матричных элементов

$$V_{12} = A_{12} \frac{2}{T} \left[\left\{ \beta_1^0 J_{kx} + \beta_2^0 J_{ky} + \beta_3^0 J_{kz} \right\} \exp(ik\omega \cdot t) + \left\{ \beta_1^0 J_{kx}^* + \beta_2^0 J_{ky}^* + \beta_3^0 J_{kz}^* \right\} \exp(-ik\omega \cdot t) \right], \quad (9)$$

где

$$J_{ki} = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \frac{R_i}{R} \frac{dV}{dR} \exp(ik\omega \cdot t) dt, J_{kj}^* = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \frac{R_i}{R} \frac{dV}{dR} \exp(-ik\omega \cdot t) dt, i = x, y, z$$

Подставляя такой матричный элемент в уравнение для коэффициентов, и пренебрегая при этом "нерезонансными" слагаемыми, вид уравнения [15], имеющий простое гармоническое решение. Этот факт мы использовали в [14] при получении решения первого приближения.

Считаем необходимым указать соотношения между частотой внешней возбуждающей силы (взаимодействия каналируемой частицы и кристалла) и энергией, которую приобретает частица до входа в кристалл в ускорителе.

$$\omega = 2\pi \frac{v}{d}, \quad (10)$$

где d - расстояние между узлами атома в системе координат, связанной с движущейся частицей.

Считая $d \approx 10^{-8}$ см, дадим численные оценки: в нерелятивистском пределе ($T \ll 1$ ГэВ):

$$\omega = \Delta E(\dot{\gamma} \hat{a}) \approx 6 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{T(\dot{\gamma} \hat{a})}{A}}, \text{ где } A - \text{ атомный вес}$$

каналируемой частицы, T - кинетическая энергия; в релятивистском пределе $\omega = 6 \cdot 10^{-6} \frac{T}{A}$, (величины те же). Значение частоты, определяющее релятивистские приближения: ≈ 10 КэВ.

Дифференциальное уравнение (1) в общем случае плохо поддается известным методам решения. В

частности, оно может быть сведено к нелинейному уравнению 1-го порядка типа Риккарти, которое в общем виде неразрешимо в квадратурах. Метод, изложенный в [14] для получения решения первого приближения, достаточно хорошо обоснован для идеального случая каналирования частицы вдоль заряженной цепочки, который был описан выше; он также может быть применен для рассмотрения каналирования в идеальных трехмерных кристаллах. Однако при попытке усложнения задачи путем учета других важных факторов: торможения каналируемой частицы вследствие потери ей энергии, тепловых колебаний атомов кристалла и т. п., мы приходим к трудностям, аналогичным тем, с которыми мы сталкивались при решении общего уравнения. Хотя уравнение первого приближения будет иметь в этом случае более простой вид чем (1), общее решение найти не удается. Не получается также найти сколько ни будь приемлемый приближенный метод решения. Кроме того, решение приближенными методами уравнения, которое также является приближением точного вида, несет в себе опасность недооценки величин ошибок до степени потери главных, наиболее интересных результатов. Поэтому дальнейший анализ поставленной задачи мы проведем с помощью решения дифференциального уравнения (1) численными методами, для движения каналируемых частиц вдоль заряженной цепочки атомов кристалла - что позволит сравнить ранее полученные данные с новыми и проверить как те, так и другие. Кроме того, далее будут учтены указанные выше поправки, касающиеся изменения скорости каналируемой частицы вследствие торможения и тепловых колебаний атомов кристалла. В данном случае будет использоваться выражение (8) в следующей форме:

$$V_{12} = A_{12} \beta_1^0 \frac{R_x}{R} \frac{dV}{dR} + A_{12} \beta_2^0 \frac{R_y}{R} \frac{dV}{dR}. \quad (11)$$

Вид потенциала выбираем кулоновский. За единицу времени мы считаем величину, обратную частоте, соответствующей разности энергий внутренних состояний каналируемой частицы. Все константы ($A_{12}, B_1, B_2, \alpha Z_1, Z_2$) мы объединяем в одну V_c - она будет являться одним из параметров расчета. Очевидно, что условие применения теории к расчетам для этой величины выглядит очень просто:

$$V_c \ll 1.$$

Другими входными параметрами будут натуральное число k - номер гармоники, и величина отклонения от точного резонанса ε .

На первом этапе мы сравним получаемые решения с решениями первого приближения.

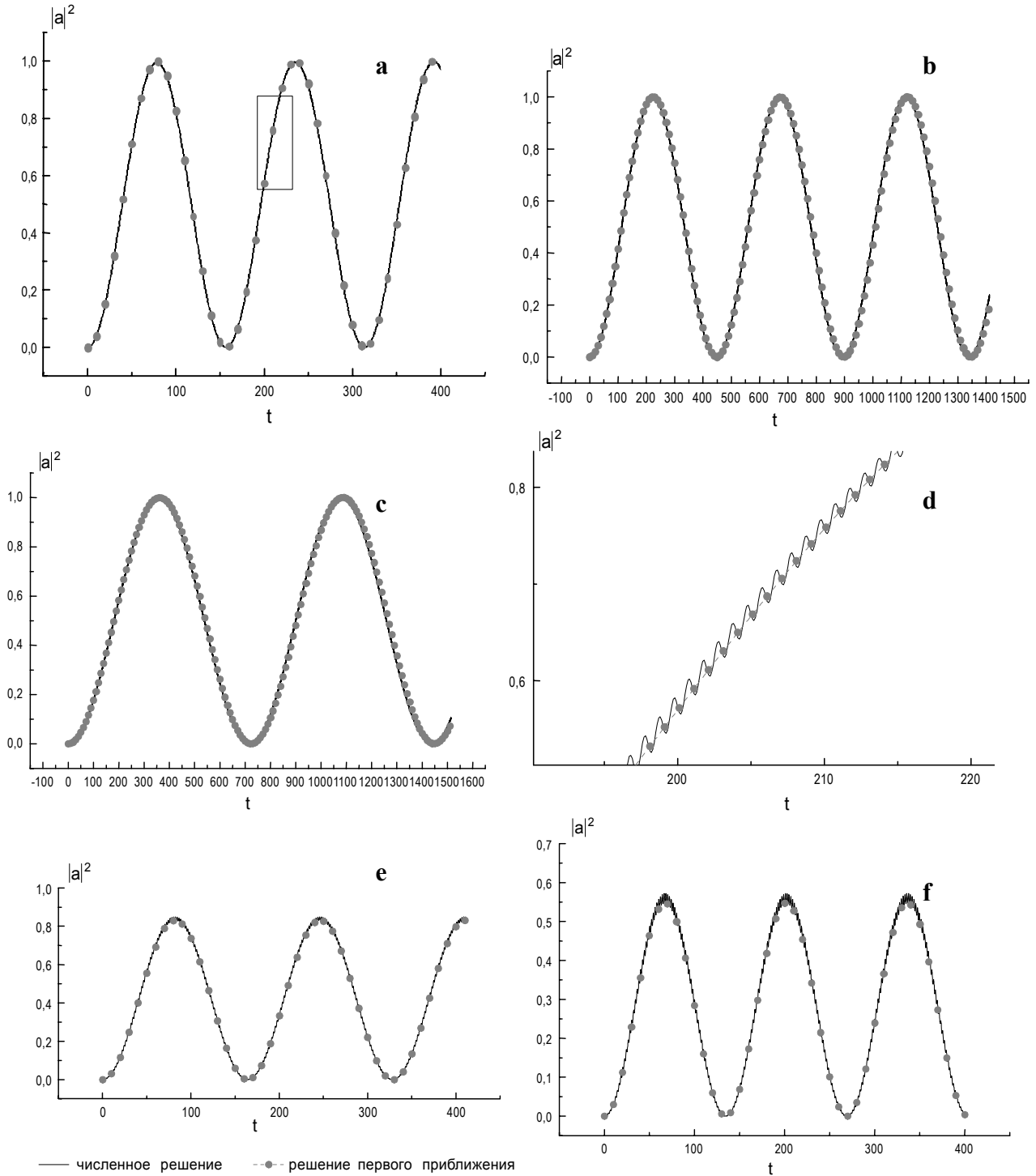


Рисунок 1. Сравнение решения первого приближения и результатов компьютерного моделирования в различных режимах а) $\varepsilon=0$; $k=1$, б) $\varepsilon=0$; $k=2$, в) $\varepsilon=0$; $k=3$, д) увеличенная часть рисунка а), е) $\varepsilon=0.015$; $k=1$, ф) $\varepsilon=0.03$; $k=1$

На рисунке 1 представлены результаты сравнения данных расчета с решением первого приближения при различных входных параметрах. В качестве функции вероятности нахождения в возбужденном состоянии первого приближения взята формула [14]:

$$a_n^2 = \frac{|p_{mn}^0|}{2\sqrt{|p_{mn}^0|^2 + \frac{\varepsilon^2}{4}}} (1 - \cos(2\sqrt{|p_{mn}^0|^2 + \frac{\varepsilon^2}{4}}t)) \quad (12)$$

при:

$$|V_{mn}^0| = V_c (J_{kx} + J_{ky}),$$

$$J_{kx} = \int_0^1 \frac{\cos(k\pi \cdot x) dx}{(1+x^2)^{3/2}},$$

$$J_{ky} = \int_0^1 \frac{x \sin(k\pi \cdot x) dx}{(1+x^2)^{3/2}}$$

На основании полученных данных можно сделать некоторые заключения:

- Выводы и результаты [14] подтверждаются с помощью независимого метода, следовательно, с одной стороны мы окончательно убеждаемся что предположения, сделанные при их обосновании, были верны, с другой мы имеем право применять первое приближение в других аналогичных задачах, если таковые не противоречат вышеупомянутым предположениям.
- Формулы первого приближения не дают точного решения, отклонения последнего имеют вид сложных квазипериодических функций с частотой, примерно равной 1 в единицах программы (соответствует разности частот каналируемой частицы) и амплитудой порядка параметра малости V_c . Такие характеристики скорее всего указывают на следующее приближение теории возмущения, величины которых могут быть вычислены при необходимости. Величина разности между точным и приближенным решением растет с увеличением разности частот (разрушением резонанса)- что налагает определенные ограничения на применение формул первого приближения.

Ранее подразумевалось, что каналируемая частица движется с постоянной скоростью, обеспечивая тем самым постоянное нахождение частоты внешней силы в резонансе с внутренней частотой возбуждения. Однако, в реальной ситуации это, не соответствует действительности. В результате взаимодействия с электронным облаком частица теряет энергию. Однако процесс потери энергии характеризуется относительно малым параметром, что дает нам возможность рассмотрения резонансного возбуждения с учетом этих изменений. В этом разделе мы будем рассматривать численные решения уравнения (1) при изменяющейся разности между частотами внешней силы и внутренних состояний:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + ht,$$

где h - скорость изменения частоты, она, очевидно, связана с ускорением частицы и действующими тормозными силами:

$$\varepsilon = 2\pi \frac{w}{d} = 2\pi \frac{F_0}{dm}.$$

Ясно, что $h < 0$. Так как мы рассматриваем область резонанса, мы ограничиваем расчеты в пределах: $\varepsilon < 0.2$

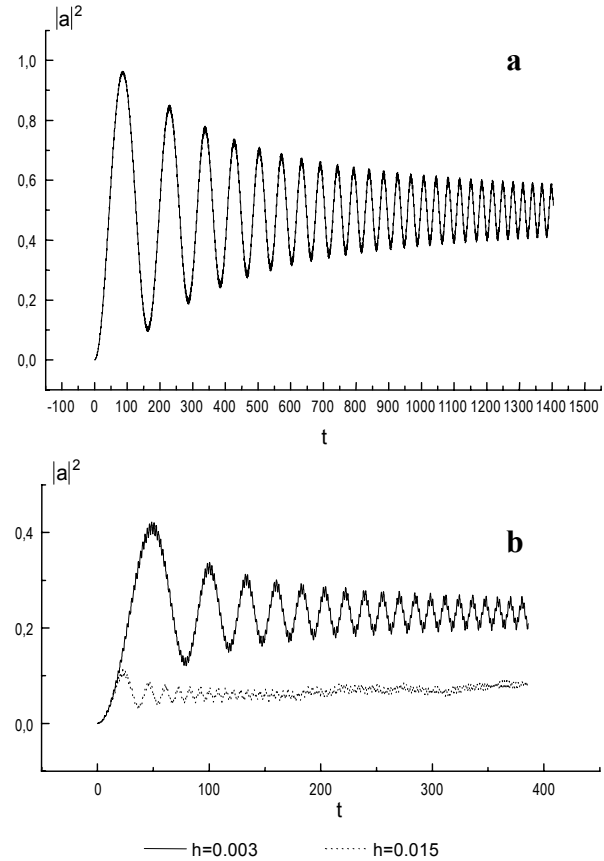


Рисунок 2. Решения при $\varepsilon_0 = 0$.
а) $h = -0.0003$, б) $h = -0.003, h = -0.015$

На рисунке 2 представлены различные варианты численных решений дифференциального уравнения (1) при $\varepsilon_0 = 0$. Видно, что при выходе системы из области резонанса вероятность стремиться к некоторому пределу. Около этой величины происходят колебания с постепенно уменьшающейся амплитудой. Данный предел растет с уменьшением величины h , и сам имеет предельное значение ~ 0.5 . (при $h \rightarrow 0$). Несколько иной характер имеют решения при $\varepsilon_0 > 0$ (Рис. 3): «второй предел» уже не ограничен величиной 0.5, а растет до значения $\sim 0.7-0.8$.

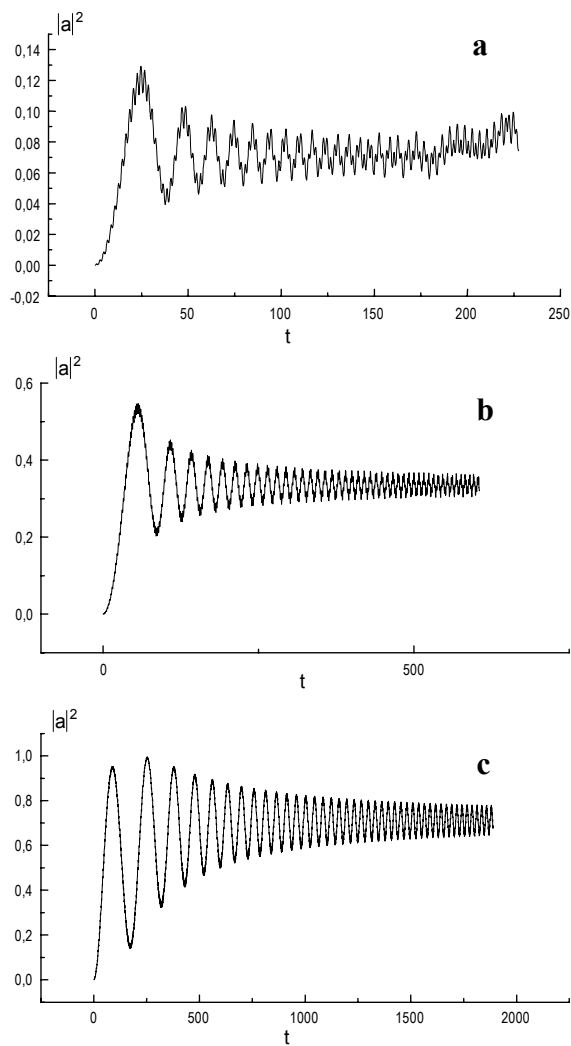


Рисунок 3. Решения при $\varepsilon_0=0.015$
a) $h=-0.015$, b) $h=-0.003$, c) $h=-0.0003$

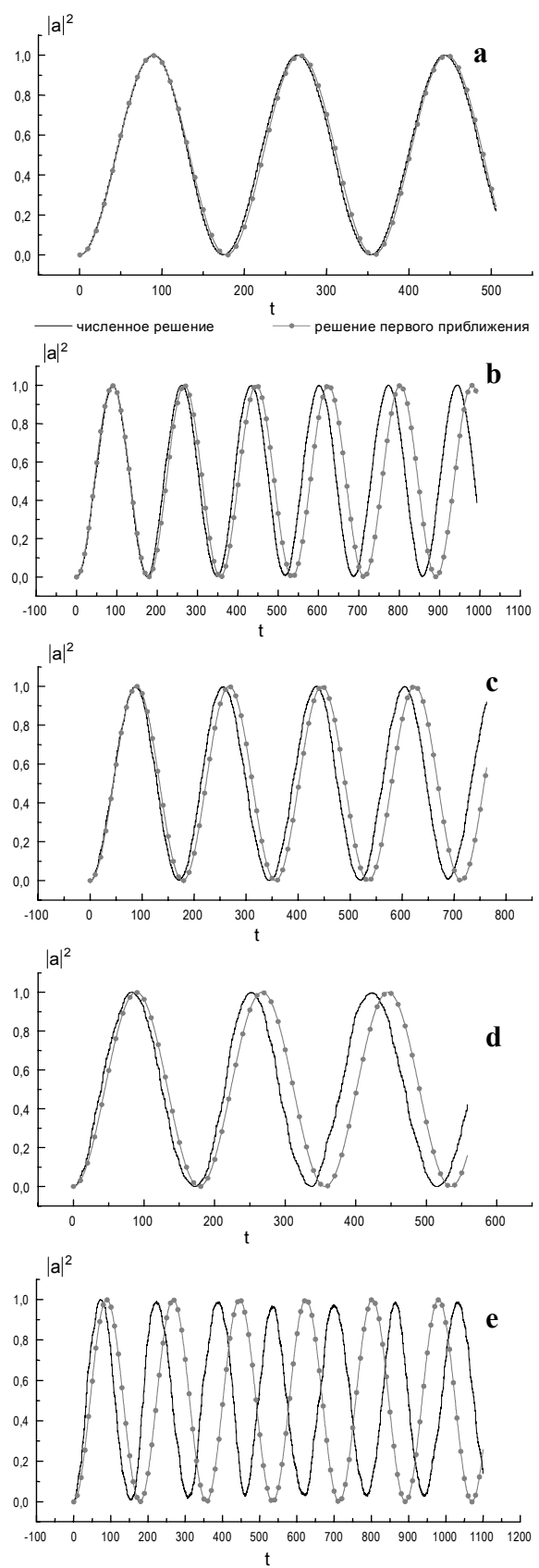


Рисунок 4. Решение задачи с учетом тепловых колебаний.
a) $\Delta d/d=0.4$, b) $\Delta d/d=0.8$, c) $\Delta d/d=1.2$, d) $\Delta d/d=1.6$, e) $\Delta d/d=2$

Таким образом на основе анализа приведенных данных можно сделать следующие выводы о решениях задач с изменением скорости:

- Потери энергии ведут к получению необходимого возбужденного состояния с некоторой определенной вероятностью, которая есть функция начального значения и изменения разности частот.
- При реальных задачах по получению возбужденных состояний наиболее эффективно будет задание энергии пучка, соответствующей частоте, большей чем необходимая частота возбуждения.
- При правильной подборе энергии пучка снижается строгость требований к другим входным параметрам эксперимента, в частности, толщине кристалла, так как на выходе мы получаем достаточно небольшие колебания около некоторой определенной величины вероятности.

Вторым эффектом, который надо учитывать при решении задач о получении возбужденных состояний при каналировании частиц в кристаллах с учетом временных изменений, можно считать тепловые колебания атомов кристаллической решетки. Мы будем учитывать этот эффект, исходя из общих соображений [3], которые отражены в программе с помощью периодической функции с произвольно меняющейся фазой и регулируемой амплитудой. Результат представлен на рисунке 4.

Для сравнения на графиках даны решения первого приближения, хорошо зарекомендовавшие себя в первом подразделе данного раздела. Из решений видно следующее:

- учет тепловых колебаний незначительно изменяет главную частоту изменения вероятности,

- наблюдается рост изменений с ростом амплитуды колебаний,
- при больших значениях амплитуды можно заметить также изменение амплитуды вероятности,
- при рассмотрении реальных задач в первом приближении тепловые колебания не будут играть значительной роли и могут не учитываться.

Итак, нами получены общие уравнения для описания резонансных возбужденных состояний при каналировании частиц в кристаллах и обоснованы условия их применения. Методами численного решения проверены ранее полученные результаты решения первого приближения, также учтены две основные поправки, которыми характеризуются реальные процессы каналирования. При этом установлено, что первая из этих поправок, изменение скорости частицы вследствие потери энергии при линейном приближении, приводит к получению возбужденных состояний с некоторой определенной вероятностью, что при правильном задании входных параметров упрощает задачу. Условием получения высокой вероятности возбужденного состояния является подбор энергии пучка, соответствующей частоте внешней силы большей, чем резонансная (но достаточно близкой). Вторая поправка, учет тепловых колебаний атомов кристаллической решетки, не вносит существенных изменений и в первом приближении может не учитываться. Если описывать решения через формулы первого приближения [14], то тепловые колебания приводят к небольшому изменению частоты периодической функции. Эти изменения растут с температурой (амплитудой колебаний).

ЛИТЕРАТУРА

1. Lindhard J., Selsk Kgl. //Ban. Vid. – Mat. – Fys., 1965, vol 34, № 14, p 45
2. Линдхард Й. //УФН, 1969, т 99, с 249.
3. Кумахов М.А. “Излучение каналированных частиц в кристаллах”, Москва, Энергоатомиздат, 1986г.
4. Таратин М.А. //Физика элементарных частиц и атомного ядра 1998 Т.29 вып.5.
5. Томпсон М. //УФН, 1969, т 99, вып. 2, с 297.
6. Белошицкий В.В. Кумахов М.А. //ДАН СССР 1973, т 212, с 846
7. Kumakhov M.A. Wendell L.R. //Phys. St. Sol. (b), 1976, vol. 76, p. 119
8. Chadderton L.// Rad. Eff., 1975, vol.27, p. 13
9. Кумахов М.А., Ширмер Г. Атомные столкновения в кристаллах. М.: Атомиздат, 1980, с 1.
10. Рябов В.А.// ЖЭТФ, 1972, т. 63, с 1096.
11. Кумахов М.А. //ДАН СССР, 1976, 230, № 5 с.1077
12. Цыганов Э. Н. Препринт Fermi- Lab. № 682 1976
13. Такибаев Н.Ж. // Доклады НАН РК 2000г № 5 с 35.
14. Красовицкий П.М. Такибаев Н.Ж.// Вестник НЯЦ РК "Ядерная физика и радиационное материаловедение" № 4, 2001.с 31.
15. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика (нерелятивистская теория), Москва, Наука, 1989г.

**ҚҰРАМА БӨЛШЕКТЕРДІҢ ОЛАРДЫ КРИСТАЛДАРДА
АРНАЛАҒАН КЕЗДЕ ҚОЗДЫРЫАҒАН РЕЗОНАНСТЫҚ КҮЙІНДЕГІ ҚСИСТТЕРІ**

Н.Ж. Тәкібаев, П.М. Красовицкий

ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы

Құрама бөлшектердің оларды кристалдарда арналаған кездегі резонанстық қозу кұбылыстарын компьютерлік үлгілеу жөкінде бірсыныра нәтижелер берілген. Тексеру өткізу мақсатымен компьютерлік үлгілеу және бірінші жуықтална шешімдерінің нәтижелерін салыстыру жүргізілген; арналаудың нақтылы процестеріне сай келуші екі негізгі түзету: энергия шығыны салдырынан жылдамдықтың кемуі және кристалдық тардың жылулық тербелістерін есепке алу ұсынылған.

**PROPERTIES OF EXCITED RESONANT CONDITION
OF COMPOUND FRAGMENTS AT A CHANNELLING THEM IN CRYSTALS**

N.Zh. Takibayev, P.M. Krassovitsky

Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty

Danes some outcomes on computer simulation of phenomena of a resonance activation of composite fragments at a channelling them in crystals. With the purpose of check matching outcomes of computer simulation and solutions of the maiden approaching is given; two main (basic) corrections conforming to actual processes of a channelling are submitted(shown): reduction(decreasing) of speed owing to energy loss and count of thermal lattice vibrations.

УДК 537.533.3

РАЗВИТИЕ ПРЕЦИЗИОННОЙ СЕЛЕКТИВНОЙ ПО ГЛУБИНЕ МЕССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ НА ЭЛЕКТРОННОМ ИЗЛУЧЕНИИ

Алдияров Н.У., Жданов В.С., Кадыржанов К.К., Рыжих В.Ю., Якушев Е.М.

Институт ядерной физики ИЯЦ РК

Найдены условия достижения высокой разрешающей способности метода селективной по глубине мессбауэровской спектроскопии (DS CEMS) на комбинированной установке бета-спектрометр – ядерный гамма-резонансный спектрометр. Сделан существенный шаг в развитии метода при реализации на магнитном секторном бета-спектрометре с двойной фокусировкой, оснащенном источником электронов (образцом) большой площади и позиционно-чувствительным детектором. Представлен симметричный вариант магнитного секторного бета-спектрометра, позволяющий более полно реализовать возможности метода.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое использование методов мессбауэровской спектроскопии в различных ядерно-физических исследованиях, в том числе в исследованиях свойств материалов на микроскопическом уровне, требует постоянного внимания к совершенствованию их приборного оснащения. В последние годы, в частности, активно развивается метод селективной по глубине мессбауэровской спектроскопии на конверсионных электронах или Depth Selective Conversion Electron Mössbauer Spectroscopy (DS CEMS), который позволяет получать мессбауэровскую информацию от приповерхностных слоев с высоким разрешением по глубине. Особый интерес представляют прецизионные исследования методом DS CEMS на комбинированной установке бета-спектрометр – ядерный гамма-резонансный спектрометр. Качество таких исследований определяется прежде всего возможностями используемого бета-спектрометра.

УСЛОВИЯ ДОСТИЖЕНИЯ ВЫСОКОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МЕТОДА СЕЛЕКТИВНОЙ ПО ГЛУБИНЕ МЕССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ НА КОНВЕРСИОННЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

Метод DS CEMS реализуется путем измерения мессбауэровских спектров на различных участках низкоэнергетической стороны линии электронов внутренней конверсии, форма которой определяется процессами рассеяния конверсионных электронов в исследуемом материале. Обратимся к верхней части рисунка 1, на которой представлены энергетические распределения электронов, рассеянных слоями металлического железа различной толщины, определяющие профиль низкоэнергетической стороны К-конверсионной линии 7,3 кэВ. Профиль изображен пунктирной линией. Каждому участку этого профиля соответствует «преобладающий» вклад определенного слоя. Вообще разрешающая способность метода определяется тем, насколько сильно, в зависимости от средней энергии регистрируемого участка конверсионной линии, изменяются вклады в регистрируемую интенсивность от слоев с различных

глубин. Идеальным был бы случай, когда, скажем, при энергии 7,3 кэВ распределения 2, 3 и 4 имели бы интенсивность равную нулю, а при 7,0 кэВ отличную от нуля интенсивность имело бы только распределение 4.

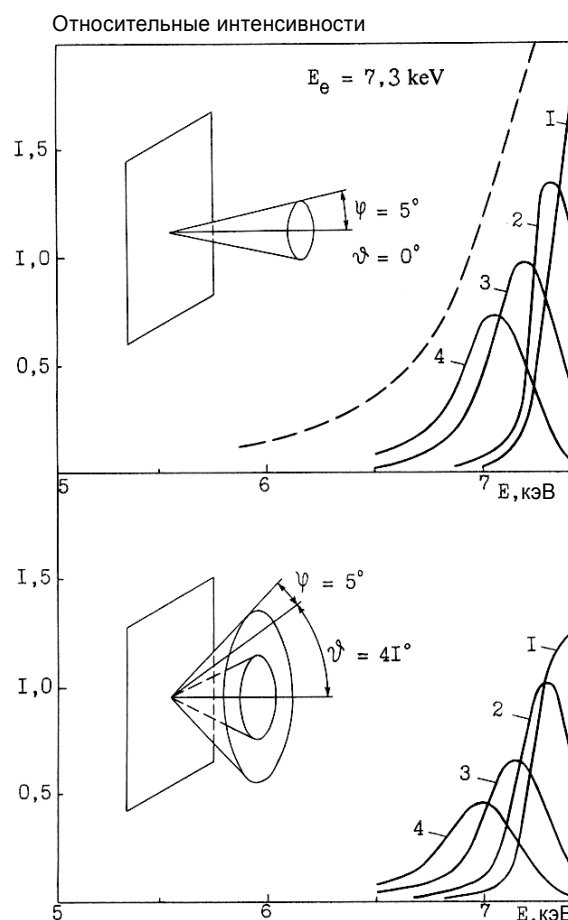


Рисунок 1. Энергетические и угловые распределения электронов, рассеянных слоями металлического железа различной толщины. Изотропный моноэнергетический излучатель электронов с энергией 7,3 кэВ “покрывался” слоями металлического железа толщиной: 1 - 5 нм, 2 - 10 нм, 3 - 20 нм, 4 - 30 нм.

Разрешение по глубине метода DS CEMS по «порядку» величины имеет естественный физический предел – среднюю длину свободного пробега неупругого рассеяния электронов. Длина свободного пробега, как видно из рисунка 2 [1], уменьшается от ~ 5 до $\sim 0,5$ нм в области энергий от единиц до 10 эВ, затем от 10 до 500 эВ имеется широкий минимум $\sim 0,5$ нм, свыше же 500 эВ она возрастает до ~ 5 нм. В условиях эксперимента по ряду причин разрешение по глубине не достигает этого предела, поэтому можно, минимизировав влияние этих причин, повысить разрешающую способность по глубине. Метод позволяет получать мессбауэровскую информацию от слоя к слою в пределах толщины поглощения соответствующих конверсионных электронов. Так, если для железа этот предел составляет около сотни нм, то для олова он достигает нескольких сотен нм. Из сказанного очевидна особая ценность метода для неразрушающих исследований свойств наночастиц, наносистем – исследований, ставших в последнее время весьма актуальными.

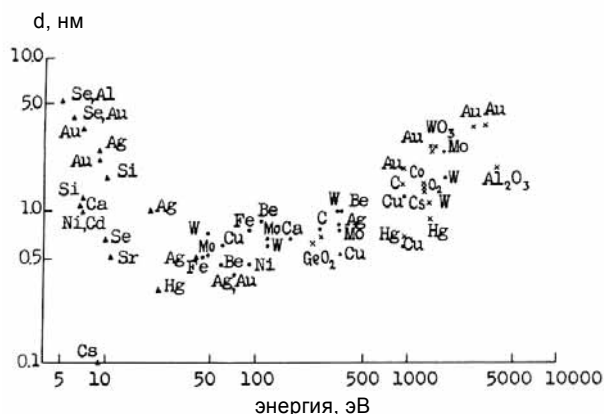


Рисунок 2. Экспериментальные значения средней длины свободного пробега d для неупругого рассеяния электронов

Область энергий, представляющая интерес для классического метода DS CEMS, включает низкоэнергетическую сторону конверсионной линии, занимающую интервал не более 10 %. Таким образом, для нас представляют интерес энергетические и угловые распределения электронов, претерпевших не слишком большое число актов рассеяния. Задача сводится к определению формы энергетических и угловых распределений от изотропного моноэнергетического излучателя, покрываемого слоями вещества различной толщины. Были проведены соответствующие расчеты для металлического железа [2]. Не углубляясь в подробности, отметим два важных результата. При вылете моноэнергетических электронов с некоторой глубины ширина энергетического распределения рассеянных электронов увеличивается с ростом угла вылета относительно нормали к поверхности, а положение максимума энергетического распределения смещается в область низких энергий. Обратимся к рисунку 1, верхняя половина которого

соответствует среднему углу вылета электронов из образца $\theta = 0^\circ$, а нижняя половина $\theta = 41^\circ$. Отметим, что уширение энергетических распределений при увеличении среднего угла вылета превосходит смещение их максимумов. Так в случае $\theta = 0^\circ$ в области максимума 4 распределения суммарный вклад от 1 и 2 распределений составляет $\sim 15\%$, а в случае $\theta = 41^\circ$ этот вклад увеличивается до $\sim 50\%$. Таким образом, выбор среднего угла вылета электронов из образца имеет существенное значение при постановке DS CEMS-эксперимента и сводится, по существу, к выбору типа бета-спектрометра комбинированной установки. Для повышения разрешающей способности по глубине необходимы «прецизионные» спектрометры, позволяющие работать на средних углах (относительно нормали к поверхности источника электронов) близких к нулю [3]. Предпочтительность выбора такого среднего угла была подтверждена нами экспериментально. Особенно привлекательны спектрометры, которые позволяют проводить «прецизионные» измерения с высокой эффективностью как на углах близких к нулю, так и на других углах, в том числе близких к 90° .

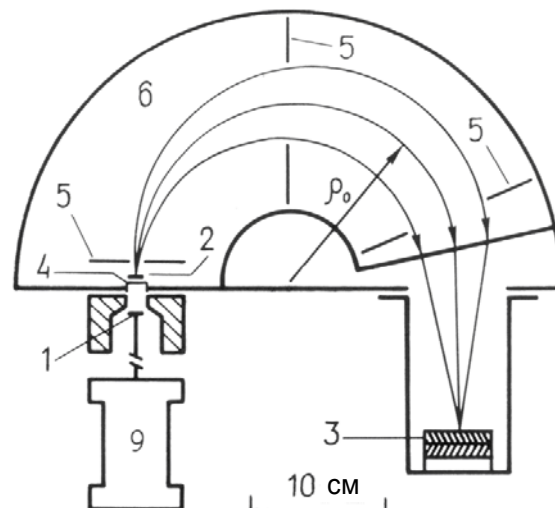
Разрешающая способность метода DS CEMS непосредственно определяется тем, какое статистически значимое количество слоев, на которые разбивается исследуемая толщина, требуется использовать при математической обработке измеренных мессбауэровских спектров. Естественно, это прямо зависит от набираемой на спектрах статистики. Существенна роль и величины отношения эффект/фон. Это далее сужает круг бета-спектрометров, наиболее подходящих для селективной по глубине мессбауэровской спектроскопии, т.е. обеспечивающих дальнейшее повышение разрешения по глубине. Итак, нам для реализации метода требуется высокоэффективный «прецизионный» бета-спектрометр с превосходным отношением эффект/фон.

РАЗВИТИЕ ПРЕЦИЗИОННОЙ СЕЛЕКТИВНОЙ ПО ГЛУБИНЕ МЕССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ НА ЭЛЕКТРОННОМ ИЗЛУЧЕНИИ

В последние десятилетия увеличение эффективности «прецизионных» бета-спектрометров осуществлялось по двум направлениям. Одно связано с поиском новых конфигураций электрических и магнитных полей или их комбинации, обладающих лучшими фокусирующими свойствами. Прогресс здесь представляется умеренным. Следует отметить, что повышение эффективности за счет существенного увеличения используемого телесного угла неприемлемо, так как это приводит к резкому падению разрешения метода DS CEMS по глубине. В другом направлении используются возможности, которыми обладают уже существующие типы спектрометров, в частности, наличие у некоторых из них фокальных плоскостей как в области источника, так и в области детектора. Примером могут служить бета-спектрометры с поперечным неоднородным магнит-

ным полем, обеспечивающим двойную фокусировку. Применение в таких приборах неэквивалентных источников большой площади или многоканальной регистрации позволяет без заметного ухудшения разрешающей способности многократно ускорить набор спектральной информации. Эффективность спектрометров при этом увеличивается для первого случая на порядок величины, а во втором – не менее чем на два порядка. В целом, это с лихвой компенсирует ограниченную светосилу таких приборов по сравнению с некоторыми другими типами спектрометров.

Нами в комбинированной установке для селективной по глубине мессбауэровской спектроскопии на конверсионных электронах использовался секторный бета-спектрометр с поперечным неоднородным магнитным полем, обеспечивающим двойную фокусировку. Электронно-оптическая схема бета-спектрометра представлена на рисунке 3. Его основные характеристики следующие: радиус равновесной орбиты $\rho_0 = 120$ мм; приборное разрешение по энергии - 0,7 % при светосиле 0,6 % от 4 π стерадиан; размеры источника электронов - 0,7×15 мм². Спектрометр был оснащен неэквивалентным источником электронов (исследуемым образцом) 2 в многоленточном варианте и позиционно-чувствительным детектором 3 на основе шеврона микроканальных пластин. Общая площадь многоленточного источника достигает 150 мм². Детектор (Дополнительно создан усовершенствованный позиционно-чувствительный детектор (Рис.4) с входным окном 40 × 22 мм², учитывающим увеличение β -спектрометра.) имеет входное окно 40×17 мм², что позволяет «одновременно» регистрировать участок электронного спектра в относительном энергетическом интервале ~ 10%. Этого вполне достаточно для выполнения процедуры DS CEMS-анализа по нескольким «одновременно» измеряемым мессбауэровским спектрам. Значительного снижения уровня фоновых срабатываний удалось достичь путем оптимизации формы амплитудного распределения импульсов с шеврона микроканальных пластин в насыщенном режиме как по величине зазоров, так и по значению потенциалов на них. Наконец, видно, что средние углы вылета электронов относительно нормали к поверхности образца в бета-спектрометре близки к нулю. Имеется возможность работать и на других углах, в том числе около 90°.



1 - мессбауэровский источник, 2 - многоленточный источник электронов (исследуемый образец), 3 - позиционно-чувствительный детектор, 4 - бериллиевое окно, 5 - апертурные диафрагмы, 6 - секторные полюса, 7 - вибратор

Рисунок 3. Схема магнитного секторного бета-спектрометра комбинированной установки для селективной по глубине мессбауэровской спектроскопии на конверсионных электронах

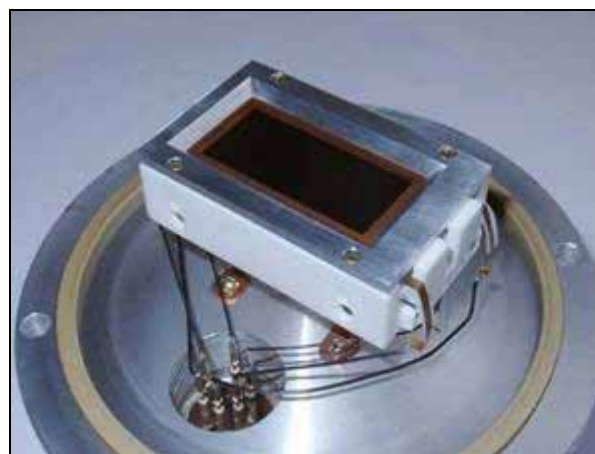


Рисунок 4. Усовершенствованный позиционно-чувствительный детектор на основе шеврона микроканальных пластин. Размер входного окна 40 × 22 мм²

Представление о рабочих характеристиках бета-спектрометра в мессбауэровском эксперименте дает рисунок 5а, на котором показана К-конверсионная линия гамма-перехода 14,4 кэВ в ⁵⁷Fe, а также его К-Оже спектр. Здесь же (Рис. 5б), приведены аналогичные спектры японской группы [4], снятые на электростатическом спектрометре, специально разработанном для метода DS CEMS. Сравнительный анализ представленных спектров позволяет утверждать, что наш спектрометр оказался существенно более эффективным.

Прекрасной иллюстрацией возможностей метода является рисунок 6, на котором представлен ряд мессбауэровских спектров двухслойного модельного образца $^{57}\text{Fe} - ^{57}\text{FeAl}$, измеренных с помощью нашей установки на различных участках К-конверсионной линии – 7,3; 7,2; 7,1; 7,0; ...; 6,7 кэВ. Нижний слой $^{57}\text{FeAl}$ имеет мессбауэровский спектр в виде резонансного монопика в скоростной точке, равной нулю. Верхний слой ^{57}Fe имеет мессбауэровский спектр в виде секстета линий. С изменением энергии детектируемых электронов величины вкладов различных слоев соответствующим образом изменяются. Так, если участок конверсионной линии при вершине 7,3 кэВ несет мессбауэровскую информацию главным образом от верхнего слоя (секстет линий), то участок линии 6,7 кэВ в основном характеризует уже нижний слой (монопик). На рисунке 7 представлены парциальные спектры двухслойного модельного образца, полученные в результате математической обработки измеренных мессбауэровских спектров.

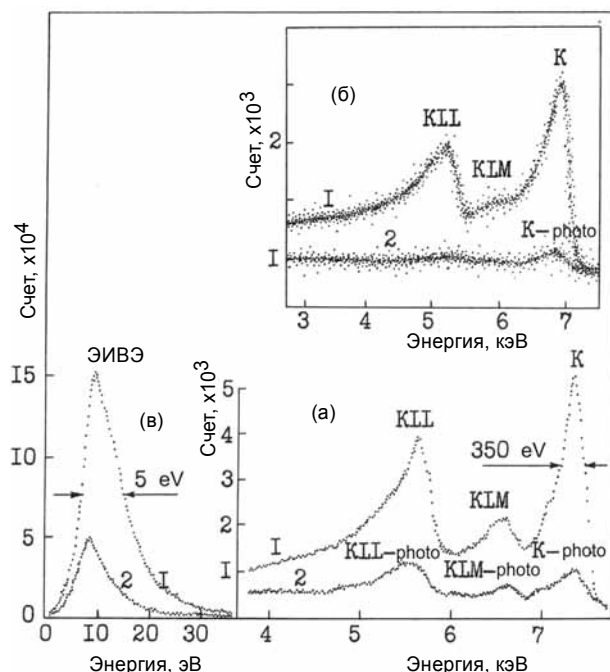


Рисунок 5. Электронные спектры, измеренные на нашем спектрометре (а, в) и на японском спектрометре (б). В левой части (в) рисунка показан спектр электронов истинно вторичной эмиссии (ЭИВЭ). Только каждая пятая экспериментально измеренная точка представлена на (а) и (в).

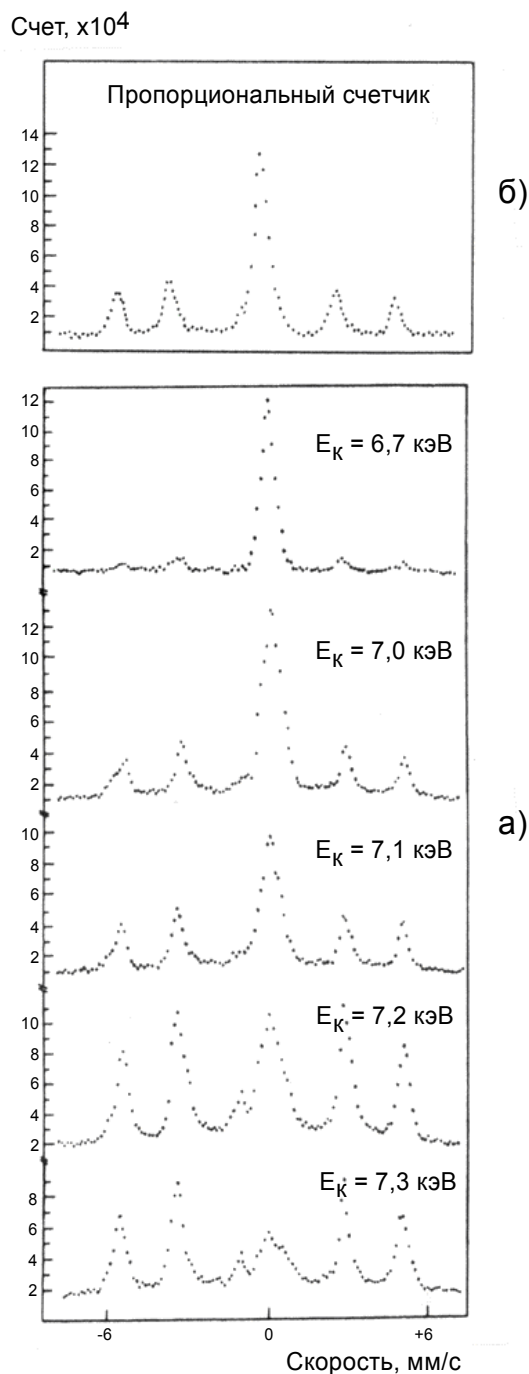


Рисунок 6. а - Мессбауэровские спектры двухслойного модельного образца $^{57}\text{Fe} - ^{57}\text{FeAl}$, полученные на К-конверсионных электронах с энергиями 7,3, 7,2, 7,1, 7,0 и 6,7 кэВ. Толщина слоя ^{57}Fe составляет 15 нм. б - Аналогичный мессбауэровский спектр того же образца, полученный на пропорциональном счетчике

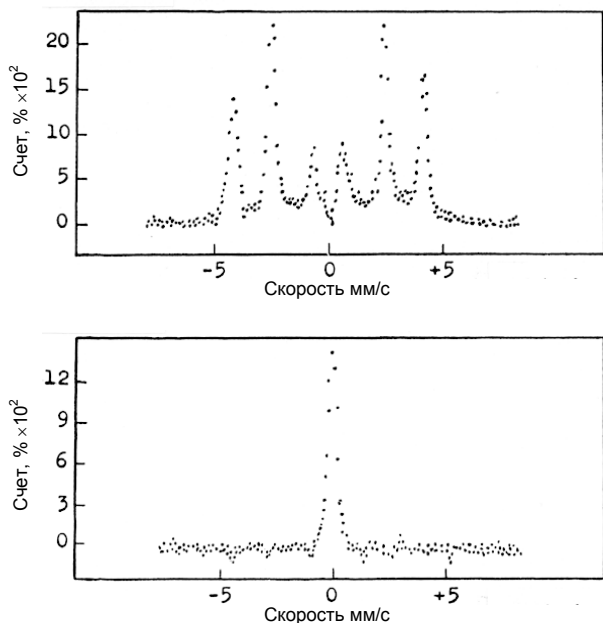


Рисунок 7. Парциальные мессбауэровские спектры двухслойного модельного образца ^{57}Fe - $^{57}\text{FeAl}$

Настоящий бета-спектрометр позволяет работать и с низкоэнергетическими электронами истинно вторичной эмиссии (Рис. 5в). В этом случае исследуется толщина порядка 10 нм с разрешением по глубине около 0,5 нм при весьма высокой эффективности измерений – в системе предускорения спектрометра собираются практически все электроны из передней полусферы. Пример мессбауэровского спектра однослойного образца ^{57}Fe измеренного на вторичных электронах с энергией от 15 до 30 эВ с помощью нашей установки, показан на рисунке 8. Значение использования в методе электронов истинно вторичной эмиссии, а также электронов Костера-Кронига и электронов Оже, попадающих по энергии в область широкого минимума (Рис. 2) и позволяющих достичь разрешения по глубине около 0,5 нм, трудно переоценить.

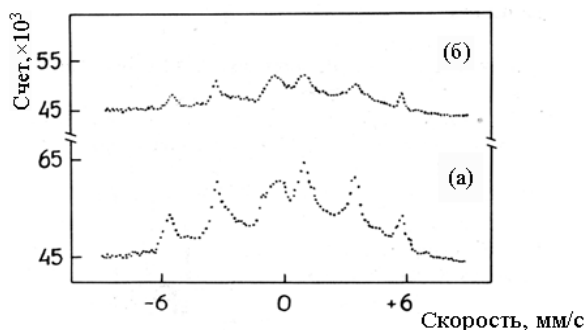
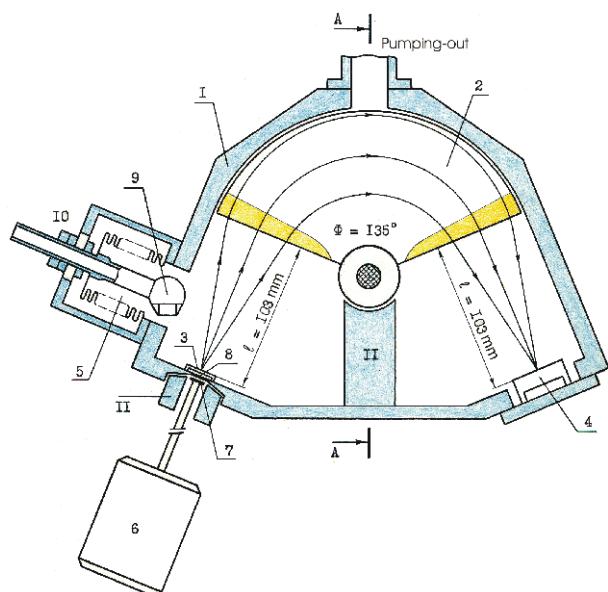


Рисунок 8. а - Мессбауэровский спектр образца из ^{57}Fe , измеренный на электронах истинно вторичной эмиссии с энергией от 15 до 30 эВ. Толщина слоя ^{57}Fe составляет 10 нм. б - Аналогичный мессбауэровский спектр того же образца из ^{57}Fe , измеренный на пропорциональной счетчике

Благодаря использованию магнитного секторного бета-спектрометра с двойной фокусировкой, с источником электронов в многоленточном варианте [5] и с позиционно-чувствительным детектором [6] удалось сделать существенный шаг в развитии метода DS CEMS [7]. Одновременное применение многоленточного источника и позиционно-чувствительного детектора наталкивается на известные трудности. Многоленточный источник обеспечивает прекрасную фокусировку в центральной части детектора. По мере смещения от центра к краям детектора, из-за нарастающего отличия потенциалов на ленточках источника от оптимальных значений, фокусировка несколько ухудшается. Экспериментально найдено соотношение между качеством фокусировки и набираемой на мессбауэровских спектрах статистикой, обеспечивающее наиболее высокое разрешение метода по глубине [8].

Комбинированная установка DS CEMS [7] обладает высокими характеристиками, однако она является достаточно сложной экспериментальной установкой и требует для своего обслуживания весьма квалифицированного персонала. Естественно, проведение массовых измерений на ней затруднено. Поэтому были предприняты усилия по оптимизации основного узла установки – магнитного секторного бета-спектрометра с двойной фокусировкой [9].

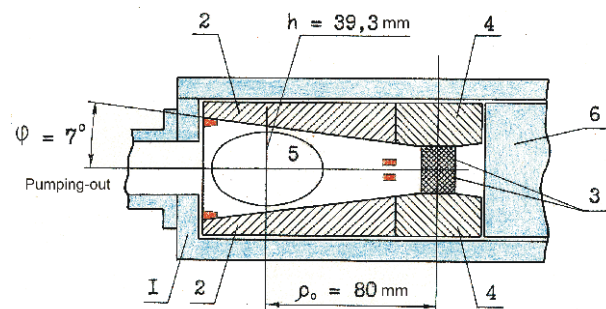
Наиболее сложным в эксплуатации блоком бета-спектрометра является позиционно-чувствительный детектор с временным съемом позиционной информации с помощью непрерывного RLC-коллектора (линии задержки), размещенного за шевроном микроканальных пластин. В соответствии с требованиями метода селективной по глубине мессбауэровской спектроскопии «одновременное» измерение мессбауэровских спектров на различных участках электронной линии можно производить с помощью мультidetектора, регистрирующей частью которого вместо непрерывного RLC-коллектора является дискретный коллектор в виде ряда изолированных металлических полосок одинакового размера. Съем позиционной информации в этом случае осуществляется с помощью дискретной линии задержки, что значительно упрощает электронное оборудование системы регистрации и позволяет достичь требуемой простоты и надежности ее эксплуатации [10]. Дальнейшее повышение разрешающей способности метода по глубине достигается приданием полоскам дискретного коллектора формы, соответствующей искривлению изображения в фокальной плоскости бета-спектрометра. При необходимости подробного прохождения участка электронной линии, соответствующего одной полоске, используется дополнительный диспергирующий элемент, установленный в спектрометре перед детектором. В режиме обычных измерений дополнительный диспергирующий элемент не влияет на поток анализируемых электронов.



1 - вакуумная камера, 2 - секторный магнит, 3 - источник электронов (исследуемый образец), 4 - позиционно-чувствительный мультidetектор, 5 - дополнительная камера, 6 - вибратор, 7 - мессбауэровский источник, 8 - бериллиевое окно, 9 - ионная пушка, 10 - устройство перемещения ионной пушки, 11 - свинцовая защита

Рисунок 9. Схема симметричного магнитного секторного бета-спектрометра комбинированной установки для селективной по глубине мессбауэровской спектроскопии на электронном излучении

Хотя наш бета-спектрометр [7] с образцом на краю межполюсного зазора соответствует максимальной светосиле, однако подробно просчитанный симметричный вариант (Рис. 9 и 10) при небольшой потере в светосиле позволяет, благодаря размещению образца вне межполюсного зазора, более полно реализовать возможности метода DS CEMS. Это, во-первых, организация экспериментов в любой геометрии; во-вторых, проведение исследований в широком температурном диапазоне; в третьих, подготовка исследуемых поверхностных и приповерхностных слоев, их модификация и реконструкция; и, наконец, возможность регистрации гамма-квантов, проходящих через образец.



1 - вакуумная камера, 2 - полюса секторного магнита, 3 - постоянные магниты, 4 - магнитопроводы, 5 - апертурная диафрагма, 6 - свинцовая защита

Рисунок 10. Сечение A – A симметричного магнитного секторного бета-спектрометра (Рис. 9)

ЛИТЕРАТУРА

1. Галон Т. Актуальные вопросы электронной Оже-спектроскопии / Электронная и ионная спектроскопия твердых тел. Под ред. Фирмэнса Л. и др. М. «Мир». 1981. 468 с.
2. Бабенков М.И., Жданов В.С., Жетбаев А.К., Рыжих В.Ю. Селективная по глубине мессбауэровская спектроскопия по электронному излучению (DS CEMS). Препринт ИЯФ НЯЦ РК. 1-93. Алматы. 1993. 40 с.
3. Бабенков М.И., Жданов В.С., Рыжих В.Ю., Чубисов М.А. // LI Международная конференция по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Саров. Россия. 2001. с.259.
4. Toriyama T., Asano K., Saneyoshi K., Hisatake K. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 1984, V.B4, P.170-185.
5. Babenkov M.I., Bobykin B.V., Zhdanov V.S., Petukhov V.K. // J. Phys. B: At. Mol. Phys. 1982, V.15, P.35-46.
6. Babenkov M.I., Zhdanov V.S., Starodubov S.A. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 1986, V.A252, P.83-86.
7. Ryzhykh V.Yu., Babenkov M.I., Bobykin B.V., Zhdanov V.S., Zhetbaev A.K. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 1990, V.B47, P.470-473.
8. Алдияров Н.У., Жданов В.С., Кадыржанов К.К., Якушев Е.М. // VIII Международная конференция «Мессбауэровская спектроскопия и её применения». Санкт-Петербург. Россия. 2002. с.207.
9. Babenkov M.I., Zhdanov V.S., Ryzhykh V.Yu. // 4-th International Conference "Modern Problems of Nuclear Physics". Book of Abstracts. Tashkent. 2001. p.143-144.
10. Алдияров Н.У., Жданов В.С., Кадыржанов К.К., Якушев Е.М. // VIII Международная конференция «Мессбауэровская спектроскопия и её применения». Санкт-Петербург. Россия. 2002. с.206.

**ЭЛЕКТРОНДЫ СӘУЛЕЛЕНУДЕГІ ТЕРЕҢДІГІ БОЙЫНША
ПРЕЦИЗИОНДЫ СЕЛЕКТИВТІ МЕССБАУЭР СПЕКТРОСКОПИЯСЫНЫҢ ДАМУЫ**

Н.У. Алдияров, В.С. Жданов, К.К. Кадыржанов, В.Ю. Рыжих, Е.М. Якушев

ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы

Бета-спектрометр – ядролық гамма-резонансты спектрометр құрама қондырғысында тереңдігі бойынша селективті мессбауэрлік спектроскопия әдісінің ажырату қабілеттілігін жоғарылату шарттары табылды. Үлкен ауданды электрондар көзімен және позиционды-сезімталды детектормен жабдықталған қос фокусты магнитті секторлы бета-спектрометрде, әдістің дамуына айтарлықтай үлкен қадам жасалды. Әдістің мүмкіндіктерін анағұрлым толық іске асыратын, магнитті секторлы бета- спектрометрдің симметриялық варианты ұсынылды.

**DEVELOPMENT OF PRECISION DEPTH SELECTIVE
MÖSSBAUER SPECTROSCOPY ON ELECTRON RADIATION**

N.U. Aldiyarov, V.S. Zhdanov, K.K. Kadyrzhanov , V.Yu. Ryzhykh , E.M. Yakushev

Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty

The conditions of achievement a high resolving power of depth selective conversion electron Mössbauer spectroscopy (DS CEMS) method on combined facility beta-spectrometer – nuclear gamma resonance spectrometer are obtained. The essential step in the method progressing is made at its realization on a magnetic sector beta-spectrometer with double focusing, equipped with electrons source (sample) of a large area and position-sensitive detector. The symmetrical variant of a magnetic sector beta-spectrometer allowing to realize possibilities of the method more completely is presented.

УДК 539.141/.142

ИЗУЧЕНИЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ $d-\alpha$ СИСТЕМЫ

Ленник С.Г., Ливенцова А.С., Такибаев Н.Ж.

Институт ядерной физики ИЯЦ РК

Выполнен расчет амплитуд процесса фоторасщепления ${}^6\text{Li}$ в $d-\alpha$ канале. Ядерное взаимодействие кластеров в конечном состоянии рассматривалось как в квазидвухчастичном приближении и в рамках задачи трех тел. Полученные результаты полезны для объяснения механизмов образования легких ядер, известных под названием x -процессов.

Исследования особенностей взаимодействия ядерных кластеров относятся к бурно развивающейся области динамики взаимодействия ядер при низких и сверхнизких энергиях и касаются, в первую очередь, изучения низкоэнергетических ядерных резонансов. Эти исследования весьма важны для выяснения ряда актуальных вопросов ядерной астрофизики [1,2].

В частности, классической проблемой ядерной астрофизики, остающейся актуальной и сегодня является объяснение распространенности химических элементов во вселенной. Так, например, механизмы образования легких ядер, известные под названием x -процессов, до сих пор остаются не ясными. Проблема здесь заключается в крайне бедной плотности элементов с $A=6-8$ в сравнении с соседними дейтерием и углеродом.

Согласно некоторым теоретическим моделям объяснение такого дефицита может быть следующее: литий, бериллий и бор, образовавшись в звездах, затем интенсивно разрушаются в реакциях под воздействием быстрых протонов [3]. Поэтому, считается, что легкие ядра в основном образуются в результате взаимодействия космических лучей с космической пылью и на дозвездной стадии эволюции Вселенной [4]. Нужно, однако, отметить, что не все численные оценки подтверждаются имеющимися экспериментальными данными.

Наличие подбарьерных и околобарьерных резонансов в ядерных системах с $A=6-8$, как нам представляется, может пролить свет на вопросы дефицита легких ядер в элементном составе вещества. Дело в том, что долгоживущие резонансы в плотной и горячей звездной материи могут проявлять себя в качестве объектов альтернативной цепочки реакции по отношению к собственно стабильным ядерным системам, то есть легким ядрам. Поэтому наработка ядер с $A \geq 12$ может идти через резонансные промежуточные образования, минуя образование стабильных ядер с $A=6-8$.

Проблему преодоления кулоновского барьера, мешающего проведению экспериментов по ядерному рассеянию в области низких кинетических энергий, можно обойти путем рассмотрения реакций расщепления ядерных систем электромагнитным облучением. При этом, интересную для исследова-

ний ядерную систему можно получить выбором подходящего по характеристикам расщепляющегося ядра и налетающего объекта [5]. В результате акта расщепления образуются фрагменты, т.е. ядерная система переходит в некоторое возбужденное состояние. В этом случае процессы ядерного взаимодействия «наблюдаются» с альтернативной позиции по отношению к обычным процессам рассеяния. В прямых (или обычных) процессах рассеяния малых относительных расстояний достигают кластеры с достаточно большой кинетической энергией. В реакциях же электромагнитного расщепления ядер образовавшиеся продукты (кластеры) уже изначально находятся на малых расстояниях.

АМПЛИТУДА ФОТОЯДЕРНЫХ ПЕРЕХОДОВ

В теории рассеяния на двух потенциалах полная амплитуда перехода факторизуется на две части:

$$f_{f \leftarrow i} = - \sum_s \langle \phi_f^{(-)} | \xi_s^{(+)} \rangle \cdot \langle \xi_s^{(+)} | V_\gamma | \phi_i^{(+)} \rangle, \quad (1)$$

где взаимодействие частиц в конечном канале выделено в виде отдельного множителя, так называемого коэффициента усиления $D = \langle \phi_f^{(-)} | \xi_s^{(+)} \rangle$, а $\xi_s^{(+)}$ - некоторый полный набор ортонормированных функций,

$$\sum_s |\xi_s^{(+)} \rangle \langle \xi_s^{(+)}| = I. \quad (2)$$

Наиболее простым базисом, отвечающим условию (2) является набор волновых функций χ_s , описывающих свободное движение частиц (например, кластеров). Соответствующая ему амплитуда примет вид

$$f_{fi} = - \sum_s \langle \phi_f^{(-)} | \chi_s \rangle \cdot \langle \chi_s | V_\gamma | \phi_i^{(+)} \rangle. \quad (3)$$

Коэффициент усиления для этого случая выражается через немассовую ядерную амплитуду $F_{fs} = \langle \phi_f^{(-)} | V_{nuc} | \chi_s \rangle$ следующим образом:

$$D_\chi = \langle \phi_f^{(-)} | \chi_s \rangle = \delta_{fs} - \frac{F_{fs}}{E_f - E_s + i0}. \quad (4)$$

Полная амплитуда процесса фоторасщепления $f_{fi} = -M_{fi} - \Delta f_{fi}$, где матричный элемент $M_{fi} = \langle \chi_f | V_\gamma | \phi_i^{(+)} \rangle$ определяет вероятность процесса фоторасщепления ядра в борновском приближении, а Δf_{fi} – соответствующая амплитуда с учетом взаимодействия частиц в конечном состоянии. В качестве последних мы выбираем свободные кластеры, считая их бесструктурными. Эффективное взаимодействие между этими кластерами должно давать результатом их связанное состояние, которым является исходное ядро-мишень. Соответственно, весь учет сильного взаимодействия в конечном канале будет содержаться в поправке $\Delta f_{fi} = \sum_s \frac{F_{fs} \cdot M_{si}}{E_f - E_s + i0}$. Сумма по промежуточным состояниям означает интегрирование по непрерывным и суммирование по дискретным переменным.

Разложение амплитуды по парциальным составляющим с орбитальным моментом L , приводит к соотношению:

$$f_{fi}^L = -M_{fi}^L - \Delta f_{fi}^L, \quad (5)$$

$$\Delta f_{fi}^L = \frac{\mu}{\pi} \left[\frac{ik_f}{2} F_{ff}^L M_{fi}^L - \frac{1}{\pi} P \int \frac{k_s^2 dk_s}{k_f^2 - k_s^2} F_{fs}^L M_{si}^L \right] \quad (6)$$

Выбор потенциала взаимодействия V_{nukl} , входящего в выражение для ядерной амплитуды F_{fs} , связан непосредственно со свойствами рассматриваемой ядерной системы. В области низких энергий хорошее описание дают взаимодействия в сепарабельной форме $V_{fs}^L = |\chi_f\rangle \lambda \langle \chi_s|$, для которых амплитуда также имеет сепарабельный вид $F_{fs}^L = |\chi_f\rangle \eta(E) \langle \chi_s|$, где $\eta(E) = \left[\lambda^{-1} - \int \frac{dk}{E - E_s + i0} |\chi|^2 \right]$.

Параметры потенциала обычно подбираются с тем, чтобы удовлетворительно описать экспериментальные данные по фазовым сдвигам. Кроме того, эти параметры можно аналитически сопоставить с характеристиками наблюдаемых в сечениях упругого рассеяния резонансных пиков [6].

ФОТОРАСЩЕПЛЕНИЕ 6Li в $d-\alpha$ КАНАЛЕ

Выраженные кластерные свойства ядра 6Li и малая энергия связи $d-\alpha$ кластеров в ядре ($E_\gamma = 1.47$ МэВ) позволяют рассматривать основное состояние ядра как связанную $d-\alpha$ систему. Волновая функция ядра 6Li в основном состоянии с хорошей точностью может быть описана в квазидвухчастичном приближении [7].

Борновский матричный элемент перехода складывается из двух слагаемых, отвечающих взаимодействию фотона с электрическим зарядом (конвективным током) и магнитным моментом (спиновым током) ядра:

$$M_{fi} = (-1)^{q_\gamma} 4\pi \sqrt{\frac{\kappa}{E_\gamma}} \left\{ \delta_{M_d M} \sqrt{\frac{4\pi}{3}} \left| k_d \right| Y_{1-q_\gamma}(\Omega_1) \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{z_d}{m_d} \cdot \frac{1}{k_\alpha^2 + \kappa^2} - \frac{z_\alpha}{m_\alpha} \cdot \frac{1}{k_d^2 + \kappa^2} \right] + \right. \\ \left. + q_\gamma \sqrt{2} (1 - \delta_{M_d M}) \frac{\mu_d}{m_d} \frac{1}{k_\alpha^2 + \kappa^2} \right\} \quad (7)$$

Здесь q_γ , $q_\gamma = E_\gamma$ – поляризация и импульс фотона; z, m, k, μ – заряд, масса, импульс и магнитный момент кластеров конечного состояния; M_d, M – проекции спинов дейтрона и ядра. Для альфа-частицы: $\mu_\alpha = 0, M_\alpha = 0$.

Парциальные составляющие $(M_{fi}^L)^L = \int P_L(\cos \theta) M_{fi} d \cos \theta$ для конвективной и спиновой части приведены на рисунке 1а,б соответственно. Отметим, что масштаб оси ординат рисунков отличается более, чем на порядок. Кроме того, в области малых энергий S-волновая спиновая компонента $(M_{fi}^{q_\gamma L})^L$ доминирует по сравнению с остальными.

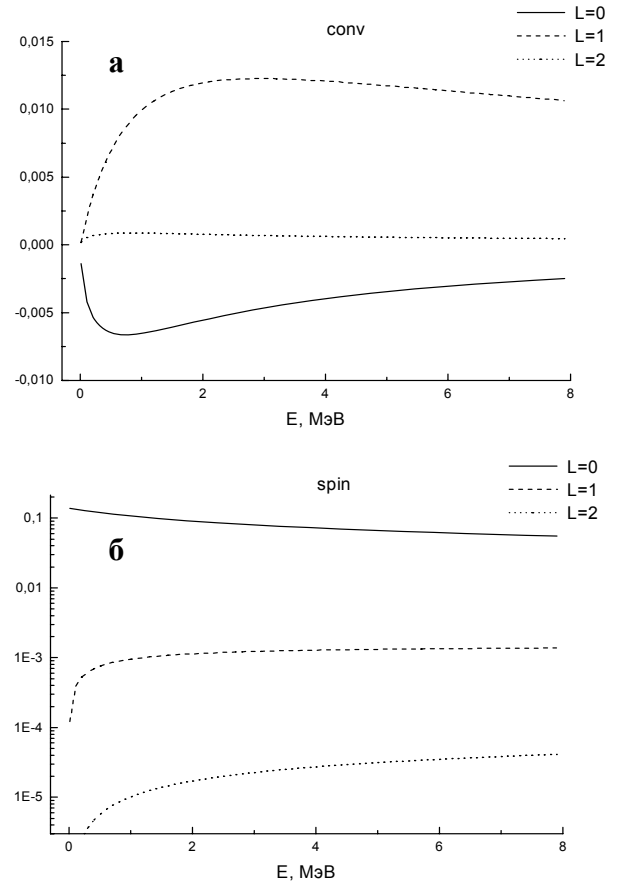


Рисунок 1.

Поэтому в результате фоторасщепления ядерные состояния, кроме состояния с $L=0$ и $S=1$, будут динамически подавлены. Сама ядерная система может иметь резонансы и в других состояниях. Например, характерное резонансное поведение имеет d - α -рассеяние при энергии порядка 1 МэВ при $L=2$ [8]. В то же время, если аномалии или резонансы имеются в выделенном канале, то возникают эффективные возможности их исследования с помощью фото-ядерных процессов.

В квазидвухчастичном приближении, когда не учитывается внутренняя структура кластеров, для состояний с определенным орбитальным моментом рассматривались различные фазовоэквивалентные потенциалы, различающиеся формой и значениями параметров, но одинаково воспроизводящие поведение экспериментальных наблюдаемых.

Расчеты Δf_{fi}^L были выполнены для следующих формфакторов сепарабельных потенциалов:

$$\langle k | \chi_{L=0} \rangle = \sqrt{\frac{8\pi\beta^3}{2\mu}} \cdot \frac{1}{(k^2 + \beta^2)}, \quad (8)$$

$$\langle k | \chi_{L=1} \rangle = \sqrt{\frac{64\pi\beta^5}{2\mu}} \cdot \frac{k}{(k^2 + \beta^2)^2}, \quad (9)$$

$$\langle k | \chi_{L=2} \rangle = \sqrt{\frac{64\pi\beta^3}{2\mu}} \cdot \frac{k^2}{(k^2 + \beta^2)^2}. \quad (10)$$

На рисунке 2. показаны энергетические зависимости парциальных фаз d - α рассеяния. Экспериментальные значения взяты из работ [9]. Теоретические кривые получены с вышеуказанными формфакторами и подобранными нами параметрами β, λ .

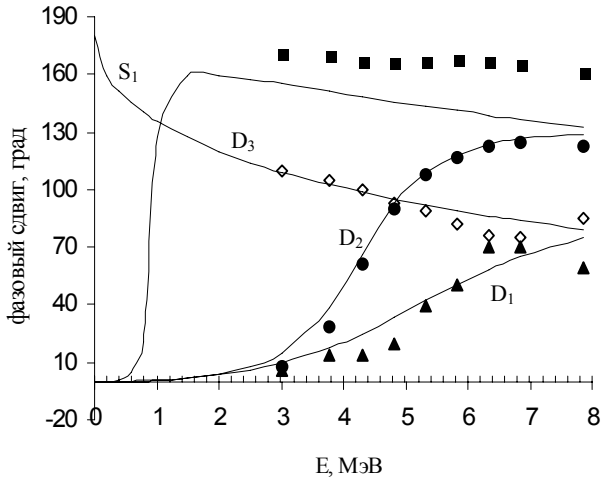


Рисунок 2.

Результаты численных расчетов величин

$$\frac{\text{Im}\{\Delta f_{fi}^L\}}{(M_{fi}^{\alpha})^L} \text{ и } \frac{\text{Re}\{\Delta f_{fi}^L\}}{(M_{fi}^{\alpha})^L}$$

приведены на рисунке 3.

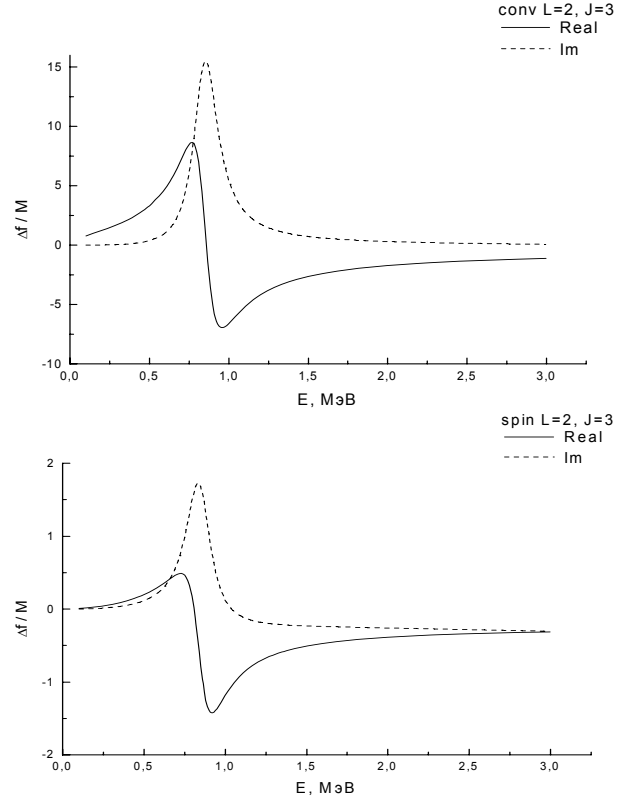


Рисунок 3.

В компонентах с $L=2$ очевидно проявляется резонансный характер взаимодействия ядерных кластеров. Положение резонансов соотносится с их положением в фазовых сдвигах d - α рассеяния.

ПРОЦЕСС ${}^6\text{Li}(\gamma, d)\alpha$ В РАМКАХ ЗАДАЧИ ТРЕХ ТЕЛ

Центральный и наиболее объемный этап исследований был связан с оценкой коэффициентов усиления в рамках задачи трех тел. Рассматривалась задача определения свойств системы трех кластеров — бесструктурной альфа-частицы и связанной системы двух нуклонов.

Эффективное взаимодействие трех кластеров имеет более сложную структуру, чем в двух кластерных системах. И это связано не только и не столько с простым усложнением системы (т.е. с увеличением числа частиц), а с явлением квантового усиления резонансных плотностей состояний и нелинейного их взаимодействия.

Одной из целей работ было выяснение специфических особенностей резонансного взаимодействия кластеров на примере $N\alpha$ системы. Дело в том, что S-волновые характеристики, отвечающие силам отталкивания в области низких энергий (что согласуется с обобщенным принципом Паули), проявляют себя как результат действия широкого резонанса, имеющегося в этом состоянии. P-волновые характеристики, в свою очередь, отражают наличие в этих состояниях уже более узких и более близких к физической области резонансных состояний.

Был проведен анализ большого числа данных прямых и косвенных экспериментов по рассеянию нуклонов на α -частицах в области низких энергий и проведено их фитирование с целью определения резонансных характеристик [10].

Отработаны несколько вариантов парных сил, действующих в N, α -системах и описывающих резонансные парные состояния. Парные силы выбирались в сепарабельной форме, где формфакторы менялись от вида с минимальной степенью падения в зависимости от энергии до вида с максимальной такой степенью.

Анализ показал, что резонансы в парных системах дают нелинейные эффекты в системе трех тел. Наложение и взаимное усиление резонансных состояний ведет к группировке слагаемых в эффективном взаимодействии для трехтельной системы. Действительно, оказалось, что эффективный потенциал, даже в случае простых парных взаимодействий, складывается из двух сил, имеющих противоположное действие: одна из которых имеет характер отталкивания и ведет к образованию резонансного состояния, а другая имеет характер притяжения и оказывается ответственной за существование связанного состояния трех тел в целом.

Отмеченное связано с тем фактом, что знаки у констант связи этих сил являются противоположными, причем силы имеют разные области действия. Так, силы притяжения доминируют в области очень низких энергий и вблизи квазидвухчастичного порога, а силы отталкивания преобладают вблизи резонансного состояния.

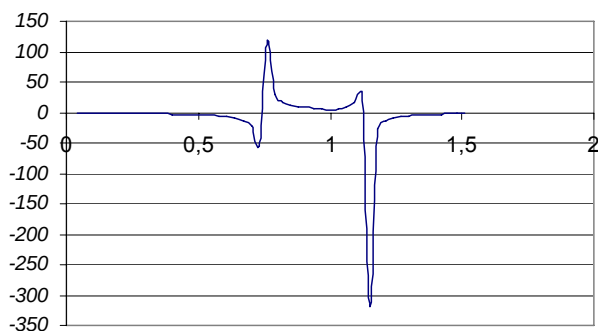


Рисунок 4. Вариант А

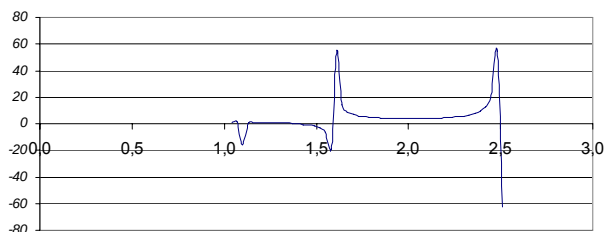


Рисунок 5. Вариант Б

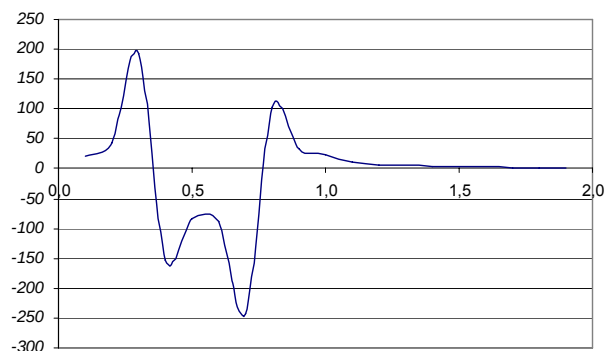


Рисунок 6. Вариант В

На рисунках 4-6 приведены результаты расчетов реальной части амплитуды, где $N\alpha$ и NN - взаимодействия считаются двухчастичными и согласованы с опытными данными (в пределах имеющегося коридора ошибок). Варианты А, Б, В отличаются наборами параметров потенциалов взаимодействия.

Величина E по оси абсцисс отвечает полной энергии, взятой с обратным знаком. Если $0 < E < 1$, то нули реальной части амплитуды отвечают точкам, где проявляются резонансы рассеяния. При $E > 1$ нули амплитуды будут отвечать связанным состояниям ($E=1$ отвечает порогу квазидвухчастичного рассеяния, $E=0$ — порогу развала системы на три свободные частицы).

Сами амплитуды определяют величину коэффициентов усиления в соответствующих конечных состояниях (относительно электромагнитных взаимодействий) в двухэтапной реакции фоторасщепления ядра лития.

Кулоновское взаимодействие в конечном состоянии учитывается лишь как поправка (есть стандартные выражения для оценки вкладов). Однако в приведенных расчетах эти поправки не включены - т.е. вычислены чисто ядерные эффекты. Это сделано, чтобы проследить изменения, связанные с чисто ядерными силами. Важно, что сдвиги положений линий спектра оказываются линейными по кулоновским силам и учитываются просто (т.е. сдвиги положения связанного состояния и узких резонансных состояний могут быть найдены по теории возмущений). Однако, для фаз рассеяния учет вклада кулоновских сил не является столь простым делом, т.к. кулоновские фазовые поправки вносят вклад не только в собственный канал рассеяния, но и в соседние. Можно сказать, что они "рассыпаются" по большому числу парциальных волн. Отсюда ясно, что почему кулоновские силы создают большие трудности при расчетах задач рассеяния, хотя имеют в сравнении с ядерными силами очень малые константы связи.

В случае расчета спектра или оценок характеристик узких резонансов указанные трудности, связанные с учетом кулоновских сил, являются, к счастью, легко преодолимыми. Физически это

объясняется высокой плотностью этих состояний в сравнении с соседними и, соответственно, незначительным перекрытием соответствующих волновых функций. Математически это обусловлено ортогонализацией собственных функций спектра по отношению к собственным функциям континуума. Если для связанного состояния такое свойство ортогональности выполняется точно, то для квазистационарных состояний - с точностью до величины, обратной среднему от оператора времени задержки. Т.е. для узких резонансов применение теории возмущений также оказывается возможным.

Существенным является то, что разброс в параметрах парных сил, например, в $N\alpha$ -взаимодействиях, создает диапазон возможных характеристик трехчастичных состояний. В частности, при фиксированных значениях энергии связи ядра лития и положения резонанса в D -волне d - α рассеяния, которые хорошо определены из опыта, система может иметь и резонансы в подбарьерной области. О важности их существования для решения ряда проблем ядерной астрофизики уже говорилось выше. Следует еще раз отметить, что их обнаружение в прямых экспериментах по рассеянию весьма затруднительно. Именно по этой причине здесь был предложен и изучался вопрос о поиске подбарьерных резонансов в экспериментах ядерного фотоэффекта, т.е. в реакциях фоторасщепления лития.

ВЫВОДЫ

Факторизация амплитуды фотоядерных переходов позволяет отдельно рассчитать вклады электромагнитного и ядерного взаимодействия в конечном состоянии. Коэффициент усиления содержит всю информацию об интегральных характеристиках сис-

темы, а вершинная функция - динамические особенности конкретного перехода.

Для процесса $\gamma + {}^6\text{Li} \rightarrow d + \alpha$, рассчитанного в рамках квазидвухчастичного подхода, показано, что полная амплитуда перехода чувствительна к характеру взаимодействия ядерных кластеров в конечном состоянии. Наличие (отсутствие) резонансов в определенных ядерных каналах d - α ведет к соответствующему резонансному поведению полной амплитуды фоторасщепления.

Анализ трехкластерного взаимодействия был осуществлен на примере процесса ${}^6\text{Li}(\gamma, d)\alpha$ с учетом резонансного кластерного N - α взаимодействия. Показано, что все вместе эти резонансные состояния инициируют новые резонансные пики в более сложных системах, таких, например, как d - α кластерные образования. Наведенные (или инициированные) резонансные пики весьма существенно зависят от характеристик "исходных" резонансов в $N\alpha$ -кластерных подсистемах. Поэтому важно было выяснить особенности резонансов в подсистемах и диапазон изменения параметров резонансных состояний.

Полученные результаты открывают новые возможности в описании и оценке так называемых x -процессов в ядерной астрофизике, дают возможность уточнить энергетику звездных и галактических систем, а также выяснить причины расхождения теоретических и экспериментальных данных по распространенности химических элементов во Вселенной, звездах, туманностях и метеоритах. Обычно предполагается, что процессы нуклеосинтеза в них идут при различных условиях, температурах и давлениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Proc. Nuclei in the Cosmos VII, Tokyo, 2002
2. Proc. International Nuclear Physics Conference, California USA, 2001
3. Рыжов В.Н., Эволюция Вселенной и происхождение атомов, Саратов: МВУИП "Сигма-плюс", 1998. 64с
4. Соболев Э.В., Изотопная космохимия, М., Атомиздат, 1974
5. Такибаев Н.Ж., Ливенцова А.С., Ленник С.Г., Реакции фотопоглощения на ядрах как инструмент изучения особенностей трехкластерных амплитуд рассеяния, Труды 3-й межд. конф. Ядерная и радиационная физика, т.1, 2001, Алматы, Казахстан, с.274
6. Такибаев Н.Ж., Простая потенциальная модель описания резонансов в процессах рассеяния двух частиц, Препринт ИЯФ НЯЦ РК 2001 г., № 18-2001, Алматы, 11 стр.
7. Такибаев Н.Ж., Ленник С.Г., Ливенцова А.С., Изучение особенностей взаимодействия низкоэнергетических кластеров, Вестник НЯЦ РК, 2001, вып.2, стр.58
8. Ajzenberg-Selove F., Energy levels of light nuclei $A=5-10$, Nucl.Phys.A, 1988, v. 490, p.5
9. Grueble W. et al., Investigation of analysing power maxima in d - α scattering, Nucl.Phys.A, 1975, v. 242, p.265
10. Ленник С.Г., Ливенцова А.С., Такибаев Н.Ж. « α - N и α - d системы в области очень низких энергий: обзор данных эксперимента и теории, состояние проблемы» Препринт ИЯФ НЯЦ РК № 19-2001, Алматы, 2001 г., 23 стр.

ТӨМЕНЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ $d-\alpha$ ЖҮЙЕНІ ЗЕРТТЕП БІЛУ

С.Г. Ленник, А.С. Ливенцова, Н.Ж. Тәкібев

ҚР ҰАО Ядролық физика институты, Алматы

$d-\alpha$ арнадағы ${}^6\text{Li}$ фотобөлшектену процесінің амплитудаларына есептеме орындалған. Ақырғы күйіндегі кластерлердің ядролық өзара әрекеттесуі квазиекібөлшекті жуықтау және үш дене есебі шеңберінде қарастырылды. Алынған нәтижелер, x -процестер деген атаумен белгілі, жеңіл ядролардың құрылу тетінтерін түсіндіру үшін пайдаға асады.

LEARNING OF $d-\alpha$ SYSTEM AT LOW-ENERGY

S.G. Lennik, A.S. Liventsova, N.Zh. Takibayev

Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty

The calculation of amplitudes of ${}^6\text{Li}$ photodisintegration process in the $d-\alpha$ channel is executed. The nuclear interaction of final state clusters was considered as in quasi two-particle approach and within the framework of three body problem. The obtained results are useful to explanation of mechanisms of creation of light nuclei, which known as x -processes.

УДК 539.2; 621.793

ИОННО-ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЕРИЛЛИЕВОЙ И БЕРИЛЛИЙСОДЕРЖАЩЕЙ ФОЛЬГИ

Тулеушев А.Ж., Лисицын В.Н., Володин В.Н., Тулеушев Ю.Ж.

Институт ядерной физики ИЯЦ РК

Описано получение магнетронным осаждением тонких бериллиевых фольг, пригодных для использования в качестве окон, пропускающих рентгеновское излучение с низкой энергией. Проанализировано значение основных факторов, определяющих качество фольги: чистоты исходных материалов, структуры фольги и условий ее формирования.

Исследования процессов, протекающих в плазме низкого давления, послужили основой для разработки методов нанесения покрытий, в том числе самонесущих, различных по назначению, составу и области применения. Особый интерес представляет изготовление ионно-плазменным способом фольги из бериллия и его сплавов, используемых в промышленной продукции двойного назначения. В доступных нам источниках информации не содержится сведений о формировании фольги осаждением распыленного металла.

В представленной работе изложены результаты технологических исследований процессов изготовления тонкой фольги из бериллия и бериллийсодержащих материалов применительно к магнетронным системам постоянного, изучения структуры и свойств полученных изделий.

В традиционной технологии прокатки при высокой температуре в защитных оболочках уменьшение толщины бериллиевой фольги сопровождается увеличением количества привнесенных примесей и дефектов структуры, что влечет за собой понижение прочности и увеличение газопроницаемости [1]. В этой связи использование ионно-плазменной технологии для распыления материала и последующее его послойное осаждение, одновременное с формированием изделия, химический состав которого идентичен распыляемому материалу, является, на наш взгляд, предпочтительным для повышения качества и расширения ассортимента фольги.

На стадии предварительных исследований установлена зависимость качества фольги и возмож-

ность реализации технологии от многих параметров, в том числе, от качества исходного бериллия, качества плазмообразующего газа, материала, подготовки и положения подложки относительно потока плазмы, наличия антидиффузионного слоя, стабильности аномального тлеющего разряда, конструктивного оформления и некоторых других.

Вследствие того, что химический состав покрытия, полученный осаждением распыленного материала, аналогичен составу распыляемой мишени, значительное внимание уделено качеству бериллия и подготовке мишеней из него. На начальной стадии исследований использованы мишени, приготовленные механической обработкой бериллия, подвергнутого двукратной вакуумной дистилляции, с содержанием основного элемента до 99,8 мас.%. При сопоставлении технологических показателей получения образцов фольги, полученных из металла с разным содержанием примесей, установлена тенденция повышения качества изделий из бериллия с уменьшением содержания примесей в нем.

В этой связи бериллий указанного состава был подвергнут дополнительной очистке дистилляцией и фракционной перегонкой на подогреваемую изотермическую подложку с получением конденсата в виде плотных компактных пластин на НПО "Луч" (г. Подольск, Россия). Мишени изготовлены путем механической обработки пластин бериллиевого конденсата. Содержание некоторых примесей в пластинах для изготовления мишеней приведено в таблице 1.

Таблица 1. Содержание некоторых примесей в бериллии

Элемент	Al	Si	S	Cl	Cr	Mn	Fe	Zn	Ti	Mo	Sb	J	Ba	W
Содержание, мас. %·10 ⁴	10	10	2	4	3	2	4	5	4	4	1	1	1	2

Содержание тяжелых, редких, рассеянных и радиоактивных элементов составило менее 0,0001 мас.% каждого.

Предварительно установлено также, что одним из факторов, определяющих реализацию магнетронной технологии формирования покрытий является состав плазмообразующего инертного газа. Учитывая весьма высокую активность бериллия по отно-

шению к активным составляющим газовой фазы используемый в нашем случае аргон подвергали глубокой очистке от примесей в несколько операций с использованием на заключительном этапе распыленного геттера, в качестве которого использован титан. Для распыления последнего разработано устройство магнетронного типа с титановой мишенью [2]. Для уменьшения парциального давления паров

масла в рабочей камере использована криогенная ловушка, установленная между камерой и диффузионным насосом.

Одним из основных факторов, оказывающих влияние на получение бериллиевой фольги является материал и состояние поверхности подложки, используемой в процессе осаждения. Обращенная к подложке поверхность фольги копирует форму и микрорельеф поверхности подложки, поэтому шероховатость ее определяет качество изготовленной фольги. В результате технологических исследований установлено, что наиболее приемлемым для осаждения бериллиевой фольги материалом найдена легированная сталь 12Х18Н10Т, обработанная до среднего арифметического отклонения профиля, равного 0,02-0,04 мкм. Физические и химические свойства стали и бериллия наиболее соответствуют условиям процесса получения фольги. Материал подложки при контакте с бериллием не проявляет к нему заметной химической активности при температуре 150-200°C и поддается обработке до высоких классов шероховатости поверхности. Кроме того, поверхность стали не окисляется при очистке в парах органических растворителей и может быть подвергнута реставрации при уменьшении класса обработки после проведения технологических операций.

Для уменьшения адгезии формируемого бериллиевого покрытия к подложке найдено целесообразным использование промежуточного антидиффузионного слоя, индифферентного в условиях осаждения пленки к материалу подложки и собственно фольги. В качестве материала промежуточного слоя использован магнетронно нанесенный графит толщиной до 1 мкм.

Снижение неравномерности толщины пленки достигали перемещением подложки относительно потока плазмы, в частности, использованием вращения подложки в форме диска вокруг собственной оси, ортогональной плоскости мишени. Скорость вращения подложки в плоскости, параллельной мишени, поддерживали равной 20-30 с⁻¹, при минимальном расстоянии от подложки до мишени 30 мм.

Отрицательное влияние на сплошность фольги оказывает нестабильность аномального тлеющего разряда, особенно проявляющаяся при большой плотности тока, обеспечивающей достаточную производительность при формировании самонесущих покрытий. Переход аномального тлеющего разряда в дуговой сопровождается локальным нарушением структуры фольги, что приводит к появлению дефектов, ухудшению прочностных свойств и увеличению газопроницаемости готовых изделий.

Подавление дуговых разрядов осуществлено конструктивными и технологическими решениями, в числе которых установка дополнительного промежуточного электрода между мишенью и подложкой и изменение напряжения смещения подложки относительно катода. Стабилизации процесса осаж-

дения бериллиевой фольги в значительной мере способствовало совершенствование источников питания магнетрона, заключающееся в ограничении максимального тока при коротком замыкании (в нашем случае величиной 2-5 А) и длительности токовой перегрузки (не более 5 мс).

Ионно-плазменная технология разрабатывалась применительно к высокопроизводительным планарным магнетронным распылительным системам, созданным авторами к началу исследований [3], обеспечивающим, например, при подводе к магнетрону мощности 2 кВт и мишени диаметром 40 мм скорость осаждения бериллия (изменение толщины покрытия) на подложку в 50 мм от мишени 0,5 мкм/мин, меди - 5 мкм/мин. При изготовлении бериллиевой фольги скорость осаждения поддерживали около 0,2 мкм/мин.

На первом этапе технологических исследований бериллиевую фольгу получали на неподвижной стальной подложке круглой формы. Рентгенографическое и электронно-микроскопические исследования структуры показали, что фольга сформирована столбчатыми кристаллами, ориентированными [002] в плоскости поверхности образца с осью *c* решетки, ортогональной подложке, и сильно текстурирована. На изображении поверхности (Рис. 1) видна структура бериллия с характерным размером поперечника шестигранных призматических кристаллов 0,1-0,3 мкм. Оценка механических свойств фольги из бериллия, полученной таким образом, показала, что, возможный изгиб ее не превышает угол 90-110°. Такая прочность является недостаточной для технического использования.

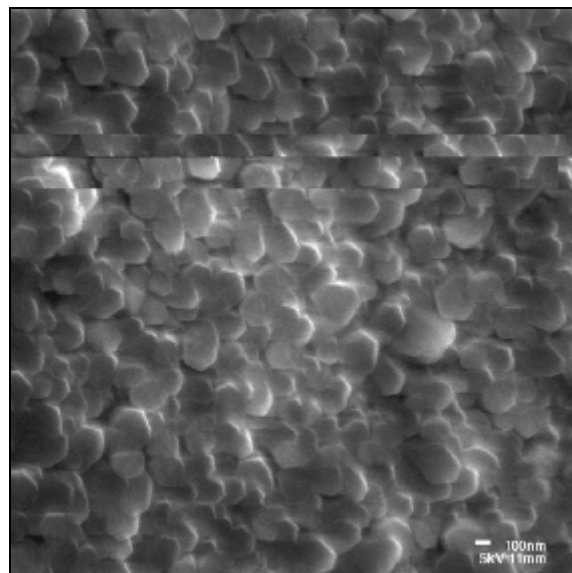


Рисунок 1. Микроструктура бериллиевой фольги (получено д-ром R. Dickerson в ЛАНЛ, США)

Организация перемещения подложки повлекла за собой изменение ориентации кристаллической структуры с [002] на [103] в плоскости образца и

повышение прочностных характеристик фольги. Столбики кристаллов в этом случае наклонены к оси с решетки под углом, зависящим от расстояния до центра вращения, что косвенно свидетельствует о достаточно большом времени рекомбинации частиц, осажденных на поверхности и важно для понимания сути протекающих процессов.

На растровых изображениях сечения бериллиевой фольги, полученных при переломе фольги по диаметру, показана столбчатая микроструктура фольги, которая сформирована с наклоном от центра фольги симметрично относительно центра (Рис. 2). Наклон кристаллитов к нормали увеличивается при удалении от центра фольги, достигая у края угол 10-15°. Направление роста кристаллитов совпадает с нормалью к поверхности фольги только в центральной части.

На изображении сечения фольги, полученном при переломе фольги поперек диаметра, отсутствует наклон кристаллитов, как и в случае с неподвижной подложкой. Микрорельеф поверхности фольги образуют зерна с размерами в интервале от 0,1 до 0,3 мкм. Исследование основных механических свойств бериллиевой фольги показало увеличение предела упругости и нормального модуля упругости на 10-15 %, а предела прочности - в 1,5 - 2 раза.

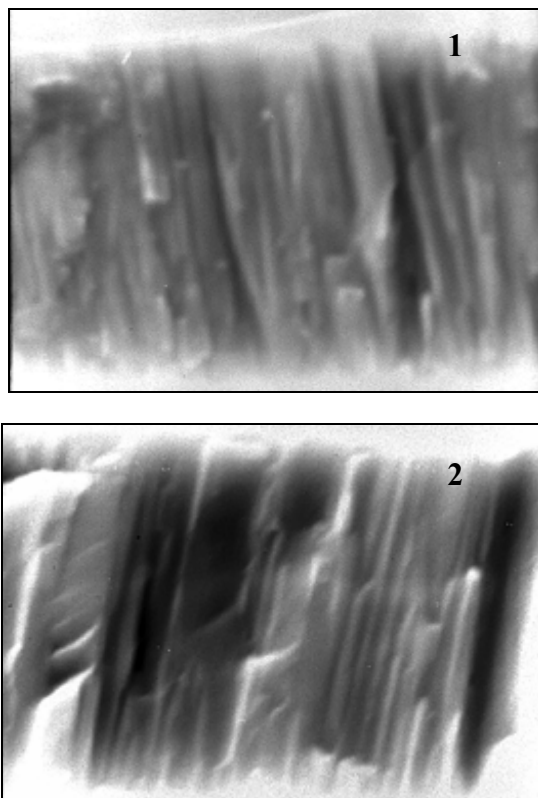


Рисунок 2. Сечение бериллиевой фольги при переломе фольги по диаметру: 1-левый край; 2 - правый край диаметра (ув. 4000)

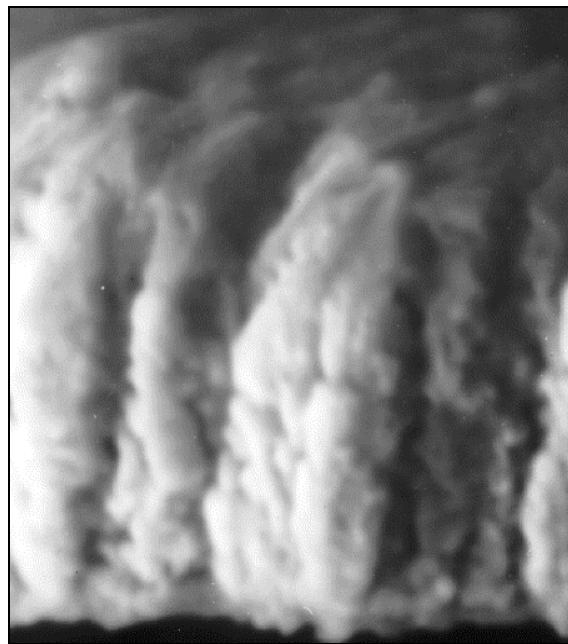


Рисунок 3. Сечение бериллиевой фольги, изготовленной прокаткой (ув. 1000)

Сечение бериллиевой фольги, полученной горячей прокаткой в вакууме по существующей технологии, показано для сравнения на рисунке 3. Основное отличие структуры прокатанной фольги заключается в увеличенных размерах зерен и в технологической текстуре материала. Величина зерен в прокатанной фольге изменяется от 10 до 50 мкм, а ориентация вытянутых кристаллитов соответствует направлениям линий скольжения в пластичном материале. На основании сравнения можно заключить, что мелкозернистая структура и сильная текстура являются основными причинами повышения упругости фольги, полученной ионно-плазменным способом.

Проверка газопроницаемости полученной бериллиевой фольги показала отсутствие течей газа через круглое окно диаметром 8 мм и толщиной 25 мкм при давлении в высоковакуумном объеме, равном 10^{-3} Па.

Проведенные технологические исследования и результаты реализации предложенной технологии получения бериллиевой фольги ионно-плазменным распылением позволили расширить круг технологических задач на изготовление бериллийсодержащей фольги, представляющей интерес для многих областей техники. Кроме того, возможность получения материалов из компонентов, весьма различающихся по своим физическим свойствам, при совместном магнетронном распылении и осаждении, открывает новые возможности для создания материалов, недоступных для традиционных технологий.

Для формирования тонкой фольги в форме лент из бериллийсодержащих материалов использована рабочая камера с двумя автономными однотипными магнетронными распылительными системами. Используя мишени из различных материалов, получа-

ли фольгу соответствующего химического состава. Концентрацию компонентов в фольге регулировали изменением скорости распыления металлов, составляющих фольгу. В камере установлена сменная полированная цилиндрическая подложка из нержавеющей стали размерами 60 х 630 мм с возможностью перемещения относительно потоков плазмы обоих магнетронов с помощью поворотного устройства с линейной скоростью до 1,25 м/с. Распыленный металл осаждали на боковую поверхность подложки, находящейся на расстоянии от мишени, равном 40 мм. Класс обработки поверхности подложки в этом случае соответствовал среднему арифметическому отклонению профиля 0,1-0,3 мкм.

Запас материала в мишенях и производительность магнетронных распылительных систем обеспечивают формирование фольги толщиной до 20 мкм площадью 3 - 4 дм² в течение 1,5 - 2 часов. Получены ленты фольги из бериллиевой бронзы и бериллий-алюминия с содержанием бериллия от 5 до 80 ат. %, а также из алюминия и меди.

Исследования распределения компонентов, фазового состава, структуры и механических свойств показали, что металлические компоненты присутствуют в фольге в виде атомных смесей, фазовые превращения происходят только при отжиге. Установлено, что фольга имеет выраженную текстуру, причем микрокристаллы ориентированы в плоскости фольги. Фольга Be-Cu после отжига состоит из твердого раствора компонентов. В фольге Be-Al после отжига формируются микрокристаллы алюминия и бериллия, количество и ориентация которых зависят от условий отжига. Установлено образование фазы Be₂₆Al при отжиге атомной смеси компонентов.

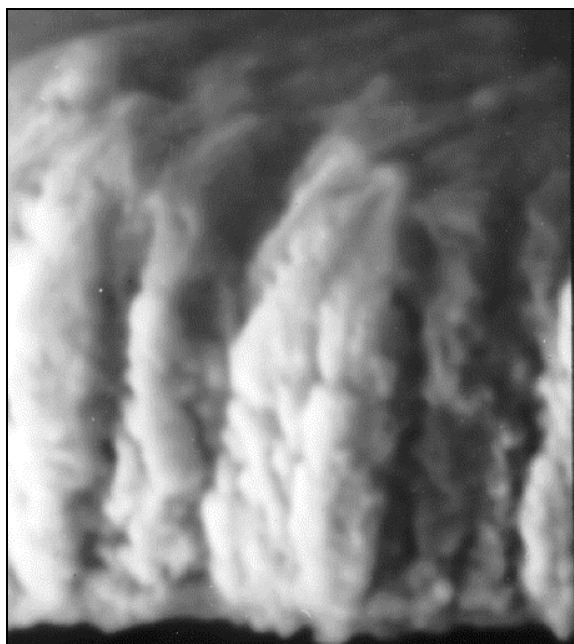


Рисунок 4. Сечение фольги Be (10 ат.%) - Cu (ув. 6000)

Полученные на электронно-зондовом микроанализаторе JCSA 733 фирмы JEOL (Japan) изображения поперечного сечения фольг из бериллиевой бронзы (Рис. 4) и из смеси Be-Al имеют одинаковую столбчатую структуру. На изображении фольги Be-Cu (12 ат. % Cu) видны границы между зернами, по которым произошло разрушение материала.

ТЕМ-изучение микроструктуры фольги Be-Cu (8 ат. % Be) показало, что фольга имеет чрезвычайно мелкозернистую структуру. Размеры микрокристаллов лежат в интервале от единиц нм до 20 нм. Состояние границ зерен не определено, поскольку любой участок образца имеет толщину большую, чем размер зерна. На кольцевых электронограммах присутствуют только отражения, соответствующие f.c.c.-решетке Cu. Так как толщина участков ТЕМ-образца, просвечиваемых электронами, значительно меньше толщины исходной фольги, следует предположить, что состав фольги неоднороден по ее толщине, и мы наблюдаем область, состоящую из меди.

Определение прочностных характеристик выполнены для медной фольги различного состава, подвергнутой часовому отжигу при температуре 800 °С, для фольги, содержащей алюминий, - при 400 °С. Из диаграмм нагружения образцов фольги определены основные параметры механических свойств: модуль упругости нормальный E , предел упругости σ_0 , предел прочности $\sigma_{\max}$, относительное удлинение δ , приведенные в таблице 2. Для проверки методики измерений проведено контрольное измерение образца алюминиевой промышленной фольги, полученной прокаткой.

Сравнение свойств фольги металлов и сплавов, полученных по традиционной [4] и ионно-плазменной технологии выявили увеличенную упругость и уменьшенную пластичность для материалов изготовленных магнетронным способом, обусловленных, по нашему мнению, хрупкостью границ между зернами металла и столбчатой структурой осажденных слоев.

Предел прочности магнетронной фольги увеличен в 1,8 раза для меди и в 3,5 раза для алюминия. Максимальное удлинение, наоборот, понижено в 20 - 30 раз, при увеличении предела упругости и нормального модуля упругости на 10 - 20 %. Для фольги бинарного состава механические параметры зависят от концентрации бериллия. Предел прочности фольги больше, чем для чистого бериллия (по данным справочника): для бронзы - в 2 раза, а для состава Be-Al - в 3 - 4 раза, при максимальном пластическом удлинении 1 %.

Таблица 2. Упругость и прочность фольги толщиной 15 мкм после отжига

Материал фольги	ат. % Be	Температура отжига, °C	Предел упругости σ_0 , МПа	Модуль упругости E, GPa	Предел прочности σ_{max} , МПа	Максимальное удлинение δ , %
Be (стандарт)	-	-	-	300	140	-
Cu (стандарт)	-	-	70	110-130	210	60
Cu	-	-	80	140	380	2,0
Cu	-	800	70	130	370	2,0
Al (стандарт)	99,9 % Al	-	22	70	50	45
Al	99,9 % Al	-	35	75	210	1,0
Al	99,9 % Al	400	23	75	280	1,8
Be-Cu	8	800	200	200	470	1,0
Be-Cu	10	800	220	250	470	1,0
Be-Cu	12	800	270	250	500	1,0
Be-Cu	16	800	310	260	520	1,0
Be-Cu	18	800	400	320	530	1,0
Be-Cu	30	800	430	390	550	1,0
Be-Al	8	400	190	220	490	1,0
Be-Al	60	400	200	340	560	0,5
Be-Al	80	400	200	400	560	0,5

Модуль упругости для бронзы (8 ат. % Be) равен 200 ГПа. С увеличением концентрации бериллия модуль упругости для бронзы увеличивается и при 18 ат. % Be достигает значение 300 ГПа как и для бериллия. Для бронзы, содержащей 30 ат. % Be, модуль упругости равен 390 ГПа. Предел упругости для бронзы возрастает от 200 до 430 МПа с увеличением концентрации бериллия от 8 до 30 ат. %.

Для фольги Be-Al с увеличением концентрации бериллия модуль упругости также возрастает (до 400 ГПа при 80 ат. % Be). Предел упругости равен 190 - 200 МПа. Предел прочности больше, чем для чистого бериллия (по данным справочника) в 3 - 4 раза. Максимальное пластическое удлинение фольги Be-Al равно 1 %.

Увеличение упругости и прочности фольг, полученных магнетронным способом, связано с мелкозернистой структурой металла, которая формируется при осаждении тонких слоев и подтверждена рентгеновским анализом структуры фольг. Установлено, что фольга во всех случаях имеет выраженную текстуру, причем микрокристаллы ориентированы в плоскости фольги, а зерна - в направлении роста, то есть в направлении нормали к плоскости фольги или под небольшим углом к ней. Низкая пластичность магнетронных фольг связана с повышенной хрупкостью границ между кристаллитами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихинский, Г.Ф. Волокита Г.И. Фольги из бериллия для приборов и физических экспериментов. /Приб. и техника эксперим., 1994, № 5, с. 191-195.
2. Тулеушев А.Ж., Тулеушев Ю.Ж. Магнетронное распылительное устройство для очистки газа. Патент РК № 6391, б.и. № 6, 1998.
3. Тулеушев А.Ж., Мухамедшин И.Ш., Ким С.Н. Устройство магнетронного реактивного распыления нитридных, карбидных и карбонитридных покрытий. Патент РФ № 2065507, б.и. № 23, 1996.
4. Под ред. Григорьева И.С. Физические величины. Москва, 1991.
5. Тулеушев А.Ж., Лисицын В.Н., Тулеушев Ю.Ж. и др. Способ получения бериллиевой и бериллийсодержащей фольги. Патент РК № 10214, б.и. № 5, 2001.
6. Тулеушев А.Ж., Володин В.Н., Лисицын В.Н. и др. Способ получения бериллиевой и бериллийсодержащей фольги и устройство для его осуществления. Патент РК № 10564, б.и. № 8, 2001.
7. Тулеушев А.Ж., Лисицын В.Н., Тулеушев Ю.Ж. и др. Способ получения бериллиевой и бериллийсодержащей фольги. Патент РФ № 2188876, б.и. № 25, 2002.

**БЕРИЛЛИЙ ЖӘНЕ БЕРИЛЛИЙ ҚОСПАЛЫ ФОЛЬГАЛАРДЫ
ИОНДЫҚ-ПЛАЗМАЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯМЕН ДАЙЫНДАУ**

А.Ж. Тулеушев, В.Н. Лисицын, В.Н. Володин, Ю.Ж. Тулеушев

ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы

Төмен энергиялы рентген сәулелерін өткізіп жіберуші саңлаулар ретінде пайдалану үшін жарамды жұқа бериллий фольгасын магнетрондық тұндыру арқылы алу сипатталған. Фольганың сапасын анықтаушы факторлардың: бастапқы материалдар тазалығының, фольга құрылымының және оның қалыптасу жағдайларының негізгі мәні талдаудан өткен.

**ION-PLASMOUS TECHNOLOGY OF PRODUCING OF BERYLLIUM
FOIL AND FOIL CONTAINING BERYLLIUM**

A.Zh. Tuleushev, V.N. Lisitzin, V.N. Volodin, Yu.Zh. Tuleushev

Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty.

There was described the receiving of fine beryllium foils by magnetron precipitation suitable for use as windows, which pass X-radiation with low energy. There was analyzed the value of main factors defining the foil quality: purity of initial materials, foil structure and conditions of its forming.

УДК УДК 539.376:621

ПОЛЗУЧЕСТЬ СТАЛИ 12Х18Н10Т ПОСЛЕ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Чумаков Е.В.

Институт ядерной физики ИЯЦ РК

В работе представлены результаты экспериментального изучения влияния предварительного реакторного облучения на характеристики ползучести и предел текучести нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Исследования показали, что условия облучения (в напряженном и ненапряженном состоянии) оказывают заметное влияние на величину предела текучести и скорость ползучести в интервале температур 280⁰С-420⁰С при напряжениях испытания 1.9...2.2 σ_{02} (σ_{02} - предел текучести). Экспериментальное изучение температурной зависимости скорости ползучести на установившейся стадии позволило установить особенности ее поведения и роль условий предварительного облучения. Показано, что облучение в напряженном состоянии (при напряжениях ниже предела текучести) приводит к разупрочнению материала. В случае облучения в ненапряженном состоянии, картина обратная, т.е. имеет место упрочнение материала.

В результате проведенной обработки экспериментальных данных получено уравнение, описывающее связь между скоростью ползучести, пределом текучести, действующим напряжением, температурой испытания и плавления.

УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЯ

Эксперименты проводились на модифицированной установке «Талгар» [1,2], которая предназначена для испытания образцов в условиях одноосного растяжения в широком интервале температур. Она состоит из двух основных частей: машины и дистанционного пульта управления, соединенных между собой кабельной линией связи. Машина позволяет проводить испытания с постоянным уровнем нагрузки и напряжения, а также в условиях переменной нагрузки и температуры. Она включает в себя электромеханический узел сило возбуждения, датчики силы и деформации и сменную ампулу с образцом и нагревательным элементом.

На дистанционном пульте управления расположены приборы контроля и регулирования параметров испытания, входящие в блок управления нагрузкой, систему контроля нагрузки, систему контроля деформации и регулятор температуры.

В качестве привода системы нагружения применен электродвигатель постоянного тока. Это обусловлено необходимостью уменьшения габаритных размеров, чем выгодно отличаются данные двигатели от двигателей переменного тока. Для обеспечения плавности нагружения и большого вращательного момента применен двигатель с большой редукцией, с количеством оборотов на выходном валу 1.5 об/мин при номинальном напряжении питания.

Для измерения величины приложенного напряжения в цепь системы нагружения включен датчик силы динамометрического типа. Особенностью данного устройства является пружина сжатия, рассчитанная по специальной схеме, что позволяет проводить испытания при постоянной нагрузке или напряжении. Применительно к данной установке разработана

сменная ампула. В собранном виде ампула стыковалась с разрывной машиной и помещалась под защиту, обеспечивающую безопасную работу с радиоактивными образцами обслуживающего персонала.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ.

Проведены испытания на ползучесть облученных в ненапряженном и напряженном состоянии образцов из нержавеющей стали 12Х18Н10Т при одноосном растяжении. Эксперименты проводились по описанной выше методике. Продолжительность одного эксперимента составляла несколько сотен часов. Результаты испытаний приведены в таблице.

Наряду со скоростью ползучести, для каждого испытываемого образца определялся предел текучести σ_{02} . Основанием для проведения исследований закономерностей поведения предела текучести в различных условиях служило несколько причин. Одна из них - это необходимостью поиска возможной корреляции между кратковременными и длительными прочностными характеристиками. Другая заключена в потребности введения нормированных величин в сравнительный анализ деформационного поведения различных материалов. Также немаловажной причиной служит то обстоятельство, что предел текучести является структурно-чувствительным параметром и его изменение может служить показателем структурно-фазовых изменений, протекающих в кристаллическом твердом теле. В настоящей работе σ_{02} определялся для каждого образца в момент нагружения при испытаниях на ползучесть.

Таблица.

№ п.п	T^0, C	T, K	$T_{пл}/T$	$\sigma, МПа$	$\sigma_{02}, МПа$	σ/σ_{02}	$\dot{\epsilon}, c^{-1}$	β
1	280	553	3.27	638	301	2.12	$4.3 \cdot 10^{-9}$	1.15
2	310	583	3.11	638	297	2.15	$2.5 \cdot 10^{-8}$	0.96
3	350	623	2.91	638	295	2.16	$1.8 \cdot 10^{-7}$	0.75
4	380	653	2.77	638	293	2.18	$8 \cdot 10^{-7}$	0.59
5	400	673	2.69	638	290	2.20	$2.3 \cdot 10^{-6}$	0.49
6	420	693	2.61	638	289	2.21	$5.5 \cdot 10^{-6}$	0.40
7	420	693	2.61	618-705	281	2.2-2.5	$>4 \cdot 10^{-6}$	<0.4
8	280**	553	3.27	638	324.8	1.93	$7 \cdot 10^{-10}$	1.34
9	310**	583	3.11	638	322.0	1.98	$5.2 \cdot 10^{-9}$	1.13
10	350**	623	2.91	638	320.0	1.99	$4 \cdot 10^{-8}$	0.92
11	380**	653	2.77	638	316.0	2.02	$1.6 \cdot 10^{-7}$	0.75
12	400**	673	2.69	638	312.0	2.04	$4.1 \cdot 10^{-7}$	0.65
13	420**	693	2.61	638	308.0	2.07	$1.2 \cdot 10^{-6}$	0.54
14	280*	553	3.27	550	260.7	2.11	$3.7 \cdot 10^{-9}$	1.16
15	280*	553	3.27	480	261.3	1.84	$4.1 \cdot 10^{-10}$	1.43
16	280*	553	3.27	638	263.0	2.43	$7.1 \cdot 10^{-8}$	0.84
17	310*	583	3.11	638	255.0	2.50	$7.8 \cdot 10^{-7}$	0.61
18	350*	623	2.91	638	253.0	2.52	$6.0 \cdot 10^{-6}$	0.39
19	380*	653	2.77	638	250.0	2.55	$9.3 \cdot 10^{-5}$	0.22
20	420*	693	2.61	480	246.9	1.94	$4.3 \cdot 10^{-7}$	0.67
21	400*	673	2.69	602	248.7	2.42	$3.3 \cdot 10^{-5}$	0.27

$T_{пл}$ и T - температура плавления и испытания соответственно, σ и σ_{02} - рабочее напряжение и предел текучести, $\dot{\epsilon}$ - скорость ползучести на установившейся стадии, σ - действующее напряжение, σ_{02} - предел текучести. ** - образцы облученные в ненапряженном состоянии, * - образцы облученные в напряженном состоянии.

Изменение предела текучести в исследованном интервале температур наглядно иллюстрируют графики, представленные на рисунке 1. Видно, что они с достаточной степенью точности могут быть описаны линейной функцией. Кроме того, из анализа графиков следует, что реакторное облучение оказывает неоднозначное воздействие на его численные величины, что служит косвенным доказательством неодинаковости процессов формирования структуры. В случае облучения образцов в напряженном состоянии во всем исследованном интервале температур наблюдается эффект разупрочнения материала, сопровождающийся снижением предела текучести по сравнению с необлученными образцами. Совершенно иная картина наблюдается при облучении в ненапряженном состоянии. Здесь имеет место эффект упрочнения, т.е. увеличения численного значения предела текучести. Различия в величинах пределов текучести облученного в напряженном и ненапряженном состоянии материала составляют 25-27%. Тот факт, что пределы текучести предварительно облученного под напряжением и в ненапряженном состоянии материала в значительной степени отличаются, весьма важен. Выявленные особенности радиационного воздействия дают ответ на вопрос о том, в какой степени условия предварительного облучения сказываются на дальнейшем деформационном поведении металлов и сплавов. Отсюда можно сделать важное с практической точки зрения заключение о том, что контроль за состоянием материалов активной зоны реакторов, проводимый с помощью образцов свидетелей в случае их облучения в ненапряженном состоянии, некорректен.

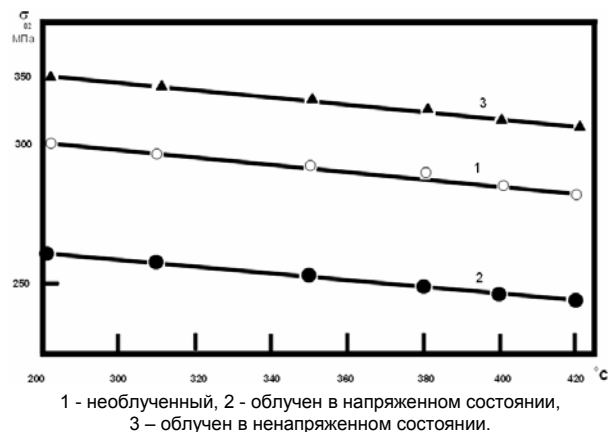


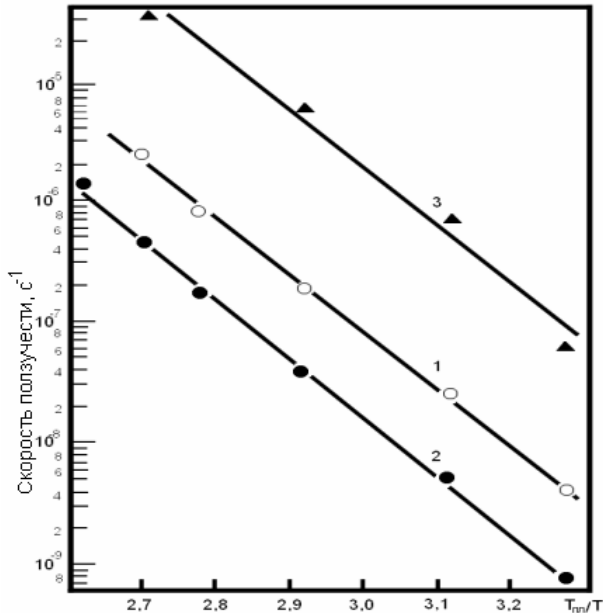
Рисунок 1. Зависимость предела текучести от температуры стали 12Х18Н10Т

Различия в формировании структуры материала, о которых свидетельствует различие в величинах предела текучести находят свое отражение на графиках зависимостей скорости ползучести от температуры, которые показаны на рисунке 2. Во всех случаях, в представленных координатах графики линейны. Проведенные исследования относятся к области низких температур и не противоречат экспериментальным данным, полученным ранее на других объектах [3,4]. Стоит отметить одну особенность. В отличие от традиционного представления абсцисса $1/T$ заменена на $T_{пл}/T$, т.е. введена нормированная на температуру плавления величина. Из графиков рисунка 2 следует, что упрочнение материала при предварительном облучении в ненапряженном состоянии приводит к снижению скорости ползучести на установившейся стадии. Снижение предела текучести при облучении

в напряженном состоянии объясняет наблюдаемое увеличение скорости ползучести. Для описания температурной зависимости скорости ползучести применимо уравнение

$$\dot{\varepsilon} = A \exp(-Q/R \cdot T_{пл}/T), \quad (1)$$

где Q – энергия активации ползучести, R – постоянная Больцмана, A – коэффициент.



1 – без облучения, 2 – облучение в ненапряженном состоянии, 3 – облучение в напряженном состоянии

Рисунок 2. Зависимость скорости ползучести стали 12Х18Н10Т от температуры

Изучение предела текучести наряду со скоростью ползучести позволяет ввести в анализ еще одну нормированную величину, условно названную напряженностью и равную отношению σ/σ_{02} . Ранее, [5] при изучении реакторной и термической ползучести ряда металлов и сплавов с ГЦК – решеткой полуэмпирическим путем было получено уравнение

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 \exp[-\alpha(T_{пл}/T - \sigma/\sigma_{02})], \quad (2)$$

где $\dot{\varepsilon}_0$ и α – коэффициенты. Уравнение (2) в явной форме объединяет такие величины, как скорость ползучести на установившейся стадии, напряжение и предел текучести, температуру плавления и испытания, что говорит о наличии связи между кратковременными и длительными характеристиками механических свойств.

С учетом уравнения (2) был построен график, показанный на рисунке 3. Здесь

$$\beta = T_{пл}/T - \sigma/\sigma_{02}. \quad (3)$$

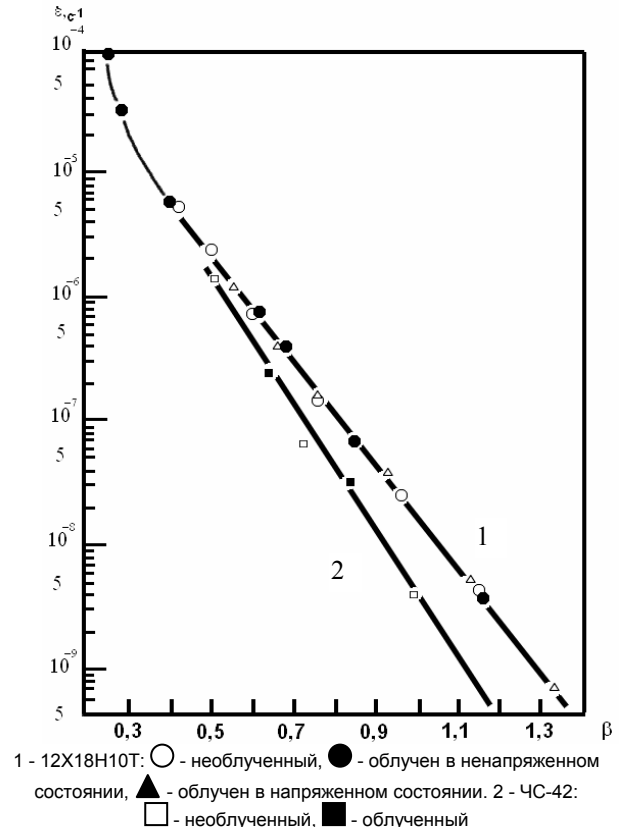


Рисунок 3. Зависимость скорости ползучести стали 12Х18Н10Т от приведенных параметров

Особенностью этого графика является то, что все экспериментальные точки ложатся на одну линию. Это чрезвычайно важно, поскольку позволяет резко сократить количество дорогостоящих экспериментов непосредственно под облучением или после предварительного облучения и проводить основную массу исследований деформационного поведения металлических материалов на необлученных образцах. При этом достаточным является знание особенностей поведения предела текучести в тех или иных условиях. Кроме того введение в анализ нормированных величин в значительной степени упрощает сравнительный анализ деформационного поведения различных материалов и делает его наглядным. С этой целью на рисунке 3 приведена аналогичная зависимость для сплава ЧС-42. Сравнение двух графиков показывает, что при равных условиях испытания сопротивление деформации ползучести у высоконикелевого сплава ЧС-42 заметно выше, чем у 12Х18Н10Т.

Выводы

Результаты экспериментального исследования показали:

1. пределы текучести предварительно облученного под напряжением и в ненапряженном состоянии материала в значительной степени отличаются друг от друга. Следовательно, контроль за состоянием материалов активной зоны реакторов,

проводимый с помощью образцов свидетелей в случае их облучения в ненапряженном состоянии, некорректен;

2. упрочнение материала при предварительном облучении в ненапряженном состоянии приводит к снижению скорости ползучести на установившейся стадии. Снижение предела текучести при облучении в напряженном состоянии объясняет наблюдаемое увеличение скорости реакторной ползучести;
3. получено уравнение, которое в явной форме объединяет такие величины, как скорость ползуче-

сти на установившейся стадии, напряжение и предел текучести, температуру плавления и испытания, что говорит о наличии связи между кратковременными и длительными характеристиками механических свойств. Оно позволяет резко сократить количество дорогостоящих экспериментов непосредственно под облучением или после предварительного облучения и проводить основную массу исследований деформационного поведения металлических материалов на необлученных образцах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э.С.Айтхожин, И.М.Николаев, Е.В.Чумаков. Установка для испытаний на ползучесть металлов в реакторе ВВР-К//Известия АН КазССР, серия физико-математическая, № 6, 1985. – С.88-89.
2. Э.С.Айтхожин, П.А.Аристов, И.М.Николаев, Е.В.Чумаков. Внутрореакторная установка для испытаний на ползучесть и длительную прочность// Известия АН КазССР, серия физико-математическая, № 6, 1990. – С.88-89.
3. Э.С.Айтхожин, Ш.Ш.Ибрагимов, Е.В.Чумаков. Температурная зависимость реакторной ползучести меди и алюминия//Атомная энергия. – 1990., Том 69, вып.3. – С. 142-145.
4. Aitkhozhin E.S., Chumakov E.V. Radiation-induced creep of copper, aluminium and their alloys//J.Nuclear Materials. 1996. – Vol. 233-237. – P.537-541/
5. Е.В.Чумаков. Реакторная и термическая ползучесть металлов и сплавов. Теория и эксперимент// Материалы 3-й международной конференции «Ядерная и радиационная физика», 4-7 июня 2001 г., Алматы, Казахстан, Том II – Радиационная физика. – С.510-522.

РЕАКТОРДА СӘУЛЕЛЕНДІРІЛГЕННЕН КЕЙІНГІ 12Х18Н10Т БОЛАТЫНЫҢ СЫРҒЫМДЫЛЫҒЫ

Е.В. Чумаков

ҚР ҰАО Ядролық физика институты, Алматы

Жұмыста 12Х18Н10Т болатының сырғымдылығы мен ағымдылық шегі көрсеткіштеріне алдын-ала реакторда сәулелендірудің әсері тәжірейбелік зерттеу нәтижелері түрінде берілген. Зерттеулер 280⁰С-420⁰С температуралар аралығында, сынақ кернеулілігі 1,9...2,2 σ_{02} (σ_{02} - ағымдылық шегі) жағдайындағы ағымдылық шегі мен сырғымдылық жылдамдығы көрсеткіштеріне сәулелендіру шарттарының (кернеулі және кернеусіз күйлерде) едәуір әсерін тигізетіндігі көрсетілді. Тәжірейбелік зерттеу орнықтандырылған кезеңдегі сырғымдылық жылдамдығының температуралық тәуелділігі алдын-ала сәулелендіру шарттарының ролі мен оның мінез-құлқының ерекшеліктерін анықтауға мүмкіндік берді. Кернеулі күйде сәулелендіру (ағымдылық шегінен төмен кернеулілікте) материалдың әлсіреуіне әкелетіндігі, кернеусіз күйінде материалдың шыңдалатындығы орын алатындығы көрсетілді.

Нәтижесінде тәжірейбелік мәліметтерді өңдеу арқасында сырғымдылық жылдамдығы, ағымдылық шегі, әсер етуші кернеу, сынақ және балку температураларының арасындағы байланысты сипаттайтын теңдеу алынды.

STEEL CREEP 12Х18Н10Т AFTER REACTOR IRRADIATION

E.V. Chumakov

Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty

The work presents the results of experimental study of influence of previous reactor irradiation on characteristics of creep and yield stress of stainless steel 12Х18Н10Т. The investigations have shown that conditions of irradiation (in stressed state or limp state) significantly influence on value of yield point and creep rate at temperature 2800C-4200C with voltage 1.9....2.2 σ_{02} . (σ_{02} .yield stress). Experimental study of the temperature dependence of creep rate on the fixed stage has allowed to determine the peculiarities of its behavior and the role of previous study conditions. It was shown that irradiation in stressed state (when voltage is lower than yield point) leads to the material weakening. In the case of irradiation in the limp state the situation is vice versa, i.e. irradiation leads to the material strengthening.

As a result of the carried out processing of experimental data there was obtained an equilibration describing the connection between creep rate, yield point, active voltage, testing and melting temperature.

УДК 39.172.13.16

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ ПРИ СВЕРХНИЗКИХ ЭНЕРГИЯХБуртебаев Н., Сагиндыков Ш.Ш., Зазулин Д.М., Басыбеков К.Б.,
Бурминский В.П., Джазипров-Кахраманов В.Дж., Зарифов Р.А., Тохтаров Р.Н.

Институт ядерной физики ИЯЦ РК

Проведен анализ упругого рассеяния протонов на ядре ^{14}N . Исследована энергетическая зависимость параметров оптического потенциала. Вычислены дифференциальные сечения и значения S-фактора реакции $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ с использованием феноменологического потенциала и новых экспериментальных данных. Результаты вычислений сравниваются с литературными данными

ВВЕДЕНИЕ

Результаты обзорных работ [1,2] по созданию библиотеки экспериментальных и оцененных данных по взаимодействию заряженных частиц с легкими ядрами показали настоятельную необходимость проведения прецизионных экспериментов по измерению сечений реакций (p,γ) и (p,α) на легких ядрах сопутствующих водородному и гелиевому циклам горения звезд, а также необходимость применения современных теоретических подходов для оценки сечения в астрофизических областях энергий. Кроме того, изучая эти реакции, можно получить важные сведения о структуре ядра, скорости протекания ядерных реакций на солнце и в звездах, в первую очередь о ядерном синтезе и о распространности тяжелых элементов в природе.

Горение водорода в звездах второго поколения главным образом происходит через протон-протонную (pp) цепочку и CNO-цикл. Реакция $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ является звеном CNO-цикла. Сечение данной реакции хорошо измерено в интервале энергий от 0.1 МэВ до 3.83 МэВ [3-5]. Однако в этих работах в области резонанса $E=1058$ кэВ имеется некоторое расхождение в абсолютной величине сечений. Кроме того оценка сечения в астрофизической области энергий, из-за наличия резонансов наталкивается на многочисленные трудности, которые можно уменьшить проведением теоретических расчетов. Нашей задачей является более точное вычисление сечения этой реакции в области резонанса $E=1058$ кэВ, расчет астрофизического S-фактора и экстраполяция его к нулевой энергии.

Скорости ядерных реакций во всех названных процессах вычисляются на основе экспериментальных сечений. Но экспериментальные данные по сечениям большинства исследуемых реакций лежат в области энергий, зачастую намного превышающих необходимые энергии. Обычно в область низких энергий экстраполируется именно S-фактор, как наиболее плавно изменяющаяся с энергией функция.

Новизна представленных расчетов состоит в том, что они проведены с использованием новых экспериментальных данных полученных нами в интервале энергий $E_p = 1055 \div 1083$ кэВ. Расчеты сечений радиационного захвата $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ проведены с использова-

нием параметров оптического потенциала, полученного на основе анализа упругого рассеяния $^{14}\text{N}(p,p)^{14}\text{N}$ в интервале энергий от 8.6 до 142 МэВ.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для расчета сечений реакции $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ в рамках двухчастичной задачи требуется лишь знание волновых функций входного и выходного каналов и спектроскопических факторов для расщепления ядра ^{15}O в канал $p+^{14}\text{N}$, так как вид гамильтониана электромагнитного перехода достаточно хорошо известен. В двухтельном подходе волновые функции входного и выходного каналов генерируются в оптическом потенциале взаимодействия системы $p+^{14}\text{N}$, параметры которого и являются входными параметрами.

Экспериментально спектроскопические факторы для присоединения протона к ядру ^{14}N , либо для отделения протона от ядра ^{15}O , определялись из реакций $^{13}\text{C}(^3\text{He},n)$ $S=1.0$, $^{14}\text{N}(^3\text{He},d)$ $S=0.87$, $^{16}\text{O}(^3\text{He},\alpha)$ $S=0.9$ [6]. В работе Шредера использовалось значение $S=1.29$. Как видно значения спектроскопических факторов, полученные из различных реакций, не совсем согласуются друг с другом.

В работе Бояркиной [7], приводится значение спектроскопического фактора, для присоединения нейтрона к ядру ^{14}N равное $S=1.02$. Так как для легких ядер с нулевым изотопическим спином спектрофакторы присоединения протона или нейтрона эквивалентны, то мы использовали в наших расчетах значение спектрофактора равное $S=1.02$.

1. Анализ экспериментальных данных упругого рассеяния

Для получения параметров оптического потенциала взаимодействия системы $p+^{14}\text{N}$ был проведен анализ упругого рассеяния протонов на ядре ^{14}N в интервале энергий от 8.6 до 142 МэВ. Анализ экспериментальных данных по упругому рассеянию протонов на ядре ^{14}N [8-13], был проведен с использованием программы ECIS88. Вначале варьировались все параметры до достижения наиболее точного согласия с экспериментом. Затем выбирались среднее значение радиуса действительной, мнимой и спин-орбитальной частей и фиксировалось для всех энергий.

Таблица 1. Параметры оптических потенциалов для упругого рассеяния протонов на ядре ^{14}N

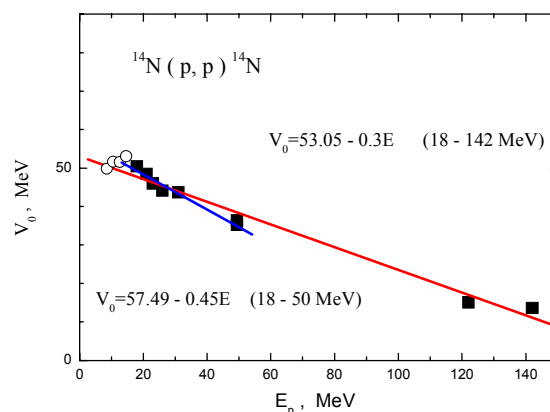
E_p	Set	V_R , МэВ	r_R , фм	a_R , фм	$-W_V$, МэВ	r_{WV} , фм	a_{WV} , фм	$-W_D$, МэВ	r_{WD} , фм	a_{WD} , фм	V_{SO} , МэВ	r_{SO} , фм	a_{SO} , фм
8,6	A	49.84	1.205	0.605				1.61	1.03	0.53	5.32	1.205	0.605
	B	46.66	1.25	0.65				1.74	1.25	0.65	6.19	1.25	0.65
10,6	A	51.71	1.205	0.605				2.44	1.03	0.53	6.48	1.205	0.605
	B	48.26	1.25	0.65				2.73	1.25	0.65	6.42	1.25	0.65
12,6	A	51.61	1.205	0.605				3.59	1.03	0.53	5.83	1.205	0.605
	B	48.99	1.25	0.65				3.75	1.25	0.65	4.67	1.25	0.65
14,6	A	53.05	1.205	0.605				6.38	1.03	0.53	3.21	1.205	0.605
	B	49.41	1.25	0.65				6.28	1.25	0.65	2.84	1.25	0.65
18	A	56.21	1.10	0.712				3.97	1.36	0.5	6.0	1.10	0.712
	B	50.44	1.25	0.62				6.05	1.25	0.33	5.21	1.25	0.62
21	A	47.27	1.20	0.688				4.32	1.36	0.5	6.0	1.20	0.688
	B	48.50	1.25	0.62				5.61	1.25	0.44	4.24	1.25	0.62
23	A	45.91	1.20	0.660				3.96	1.36	0.5	6.0	1.20	0.660
	B	46.03	1.25	0.62				4.96	1.25	0.477	5.74	1.25	0.62
26	A	44.46	1.20	0.610				4.31	1.36	0.5	6.0	1.20	0.610
	B	44.1	1.25	0.62				4.33	1.25	0.602	5.59	1.25	0.62
31	A	46.7	1.20	0.63	4.0	1.20	0.345	12.4	1.20	0.5	6.7	1.20	0.63
	B	43.68	1.25	0.62				4.0	1.25	0.718	5.59	1.25	0.62
49,4	A	38.52	1.13	0.766	6.95	1.33	0.433	1.75	1.33	0.433	8.77	1.07	0.632
	B	35.25	1.25	0.62				3.47	1.25	0.61	4.51	1.25	0.62
122	A	18.3	1.20	0.65				10.6	1.30	0.64	18.3	0.9	0.5
	B	15.12	1.25	0.62				5.01	1.25	0.717	5.31	1.25	0.62
142	A												
	B	13.61	1.25	0.62				13.22	1.25	0.42	2.87	1.25	0.62

После этого проводился поиск оптимальных параметров оптического потенциала, которые приводятся в таблице 1. Затем была исследована энергетическая зависимость оптических параметров (Рис. 1). На рисунке 2 в качестве примера приводятся результаты анализа упругого рассеяния при энергии $E=18$ МэВ.

Как видно из рисунка 1 аппроксимировать глубину потенциала линейной функцией не удастся во всем рассматриваемом энергетическом интервале. Также линейная аппроксимация при низких энергиях оказывается не вполне пригодной. Данные факты говорят о том, что вклад хвостов резонансов расположенных при низких энергиях существенен во всем энергетическом интервале. Поэтому можно сказать, что параметры оптического потенциала в области сверхнизких энергий могут несколько отличаться от полученных нами в рассматриваемом интервале энергий.

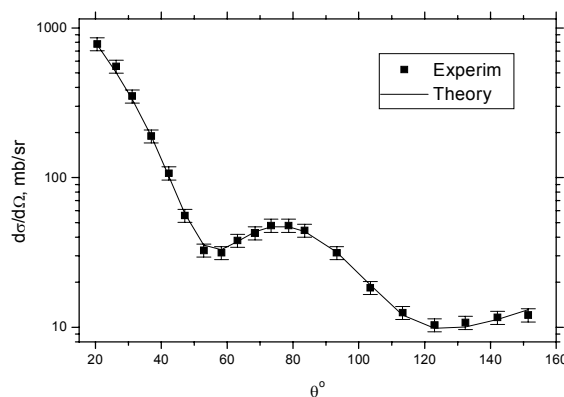
2. Расчет сечения радиационного захвата

В сечении реакции радиационного захвата $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ имеются ярко выраженные резонансы. Следовательно, применить модель прямого захвата невозможно, необходимо учитывать связь состояния рассеяния во входном канале с резонансными уровнями. Однако попытка описать сечение с помощью стандартных формул Брейта-Вигнера, не учитывающих зависимость параметров резонансных уровней от энергии, оказалась невозможной. Нами была использована зависимость в виде



Точками – результаты анализа. Верхняя линия – результаты экстраполяции для всего энергетического интервала. Нижняя линия – результаты экстраполяции для низкоэнергетического интервала.

Рисунок 1. Энергетическая зависимость ОП упругого рассеяния протонов на ядре ^{14}N



Точками – экспериментальные данные работы [8].
Линия – теоретические значения

Рисунок 2. Дифференциальное сечение упругого рассеяния протонов на ядре ^{14}N при $E=18$ МэВ

$$\Gamma(E, l) = \sqrt{\frac{E}{E_R}} \Gamma(E_R, l) \frac{P_l(E, r_o)}{P_l(E_R, r_o)} \quad (1)$$

где $P_l(E, r_o)$ кулоновская проницаемость, r_o – радиус потенциальной ямы.

Выражение для сечения имеет вид

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{V_i}{v_{in}} \frac{2\pi}{h} \left[\langle f | W_- | i \rangle + \frac{\langle f | W_- | res \rangle \langle res | V | i \rangle}{E - E_{res} - \Delta - i \frac{\Gamma}{2}} \right]^2 \frac{V_f}{(2\pi)^3} \frac{q^2}{hc} \quad (2)$$

Для расчета ВФ рассеяния и связанного состояния мы использовали, полученные выше оптические потенциалы. Для более корректного описания энергии связанного состояния параметры оптического потенциала были немного изменены. В области резонанса $E=1058$ кэВ, по формуле (2) было рассчитано дифференциальное сечение реакции $^{14}\text{N}(p,\gamma_0)^{15}\text{O}$ при угле $\theta = 90^\circ$, представленное на рисунке 3. В расчете предполагалось, что вклад дают либо E1, либо M1 переходы, и резонанс имеет место при энергии $E_p=1058$ кэВ. Однако, как видно из рисунка 3, последняя экспериментальная точка в дифференциальном сечении находится несколько выше по энергии по сравнению с теоретическим значением, что говорит о том, что при данной энергии сказывается влияние резонанса $E_p = 1.542$ МэВ.

3. Расчет астрофизического S-фактора

Реакции в звездах и термоядерных реакторах происходят при энергиях порядка 1 кэВ ($T=10^7$ K). Поэтому, как отметил Солпитер, экспериментальные сечения, которые ограничены снизу значением 50 кэВ, необходимо экстраполировать в астрофизическую область. Однако, само сечение неудобно для экстраполяции из-за нерегулярности его поведения при малых энергиях. Экстраполировать удобнее S-фактор, связанный с сечением формулой:

$$S = \frac{\sigma E_{\text{c.m.}}}{P}, \quad (3)$$

здесь P – проницаемость потенциального барьера, которая обычно, также как и сечение, быстро убывает при уменьшении энергии. Это, собственно, и обуславливает плавность зависимости S-фактора от энергии, обеспечивая точность его экстраполяции.

Наши расчеты проводились с использованием гамовской проницаемости:

$$P_G = \exp \left\{ -2 \frac{\sqrt{2\mu}}{\hbar} \frac{\gamma}{\sqrt{E}} \frac{\pi}{2} \right\}. \quad (4)$$

Согласно Солпитеру S-фактор есть величина, медленно меняющаяся с энергией и при малых энергиях стремящаяся к постоянной величине. Мы экстраполируем S-фактор многочленом четвертой степени:

$$S(E) = S(0) + B_1 E + B_2 E^2 + B_3 E^3 + B_4 E^4, \quad (5)$$

Проинтегрировав полученное выше дифференциальное сечение (формула (2)) по углам, мы получили полное сечение радиационного захвата. Рассчитав затем гамовскую проницаемость по формуле (4), мы вычислили S-фактор (по формуле (3)) в интервале энергий от 20 кэВ до 1,8 МэВ. Полученные значения S-фактора для захвата протона на основное состояние ядра ^{15}O показаны на рисунке 3 точками. Проэкстраполировав эти данные полиномом, получили следующие значения параметров (все параметры в единицах барн·кэВ $^{-1}$).

$$\begin{aligned} S(0) &= 0.29183 \\ B_1 &= -0.00253 \\ B_2 &= 5.84331 \text{E-5} \\ B_3 &= -5.89602 \text{E-7} \\ B_4 &= 2.20388 \text{E-9} \end{aligned}$$

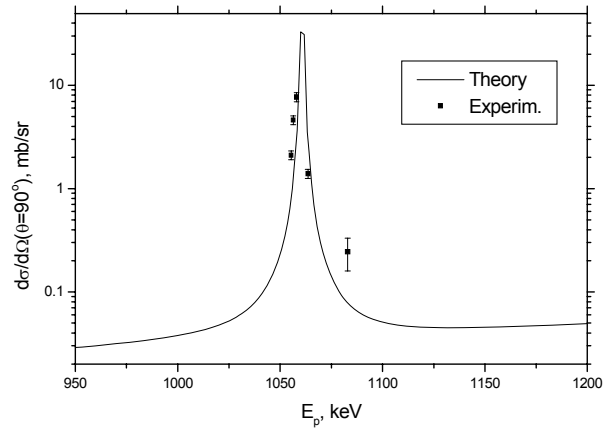


Рисунок 3. Дифференциальное сечение реакции радиационного захвата $^{14}\text{N}(p,\gamma_0)^{15}\text{O}$ при $\theta=90^\circ$ в области резонанса $E=1058$ кэВ. Точками – наши экспериментальные данные, полученные на УКП–2-1 ИЯФ НЯЦ

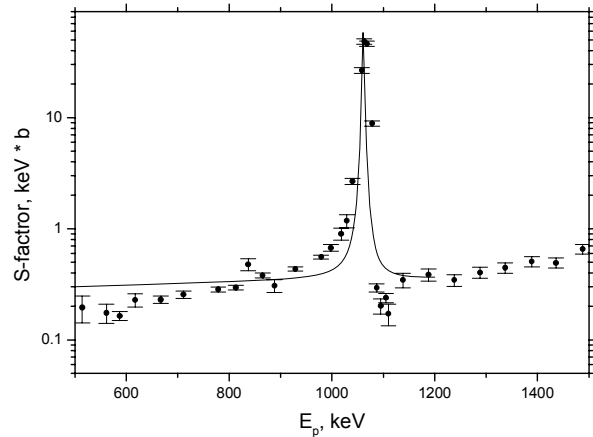


Рисунок 4. Значение S-фактора реакции радиационного захвата $^{14}\text{N}(p,\gamma_0)^{15}\text{O}$ в области резонанса $E=1058$ кэВ. Точки – экспериментальные данные работ [4-5]. Линия – теоретические значения

Полученный S-фактор близок к кривой из работ Хейбарда и Бейли [4]. В этой работе приводится значение его в нуле: $S(0)=0.27$ кэВ·барн (Рис. 5 кре-

стиком). В работе Шредера [5] приводится значение $S(0)=1.55$ кэВ·барн. Отличие полученных нами результатов от результатов работы Шредера обусловлено наличием подпорогового резонанса с энергией $E = -21$ кэВ, вклад которого был учтен Шредером. Однако из-за невозможности прямого определения ширины подпорогового резонанса, неопределенность в значении S-фактора все еще остается.

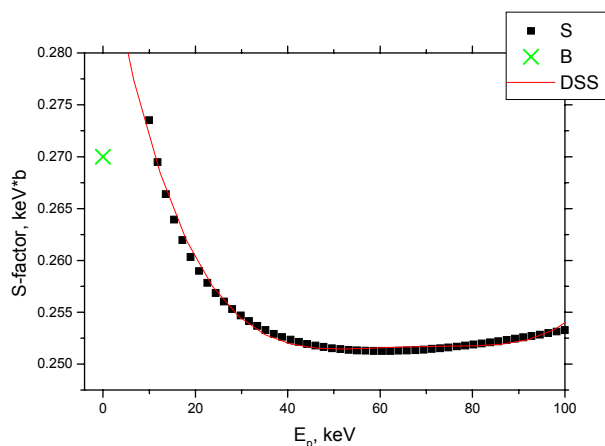


Рисунок 5. Экстраполяция теоретических значений S-фактора для захвата протона на основное состояние ядра ^{15}O в область низких энергий полиномом четвертой степени

ЛИТЕРАТУРА

1. D.B.Duncan and J.E.Perry, Phys. Rev.82 (1951) 809
2. W.A.S.Lamb and R.E.Hester, Phys. Rev. 108 (1957) 1304
3. R.E.Pixley, thesis, California Institute of Technology (1957)
4. G.M.Bailey and D.F.Hebbard, Nucl. Phys.46 (1963) 529; 49 (1963) 666
5. U.Schröder, H.W.Becker, G.Bogaert, J.Görres, C.Roles and H.P.Trautvetter; Nuclear Physics A467 (1987) 240-260, North-Holland, Amsterdam
6. A. Ajzenberg-Selove // Nucl. Phys A 490, 1988 N1.
7. Бояркина А.Н.// Структура ядер 1р-оболочки, МГУ, 1973, с. 62
8. L.F.Hansen et al. // Phys.Rev.C, 1973, V.8, P.2072-2088.
9. H.F.Lutz et al. // Nucl.Phys.A, 1972, V.198, P.257-267.
10. C.C.Kim et al. // Nucl.Phys., 1964, V.58, P.32-48..
11. A.A.Rush, E.J.Burge, D.A.Smith. // Nucl.Phys.A, 1971, V.166, P.378-392.
12. J.R.Comfort et al.// Phys.Rev.C, 1980, V.21, P.2147-2161.
13. A.E.Taylor and E.Wood // Nucl.Phys., 1961, V.25, P.642-655.

$^{14}\text{N}(\text{p},\gamma)^{15}\text{O}$ РЕАКЦИЯСЫН ОТЕ ТӨМЕН ЭНЕРГИЯЛАРДА ЗЕРТТЕУ

Н. Буртебаев, Ш.Ш. Сагиндыков, Д.М. Зазулин, К.Б. Басыбеков,
В.П. Бурминский, В.Дж. Джазаиров-Кахраманов, Р.А. Зарифов, Р.Н. Тохтаров

ҚР ҰАО Ядролық физика институты, Алматы

^{14}N ядросынан протондардың серпінді шашырауына анализ жасалынды. Оптикалық потенциал параметрлерінің энергетикалық тәуелділігі зерттелді. Жаңа эксперименталдық мағлұматтар мен феноменологиялық потенциалды қолданумен $^{14}\text{N}(\text{p},\gamma)^{15}\text{O}$ реакциясың дифференциалдық кималары және S-факторы есептелінді. Есептелген мәндер жарияланған мағлұматтармен салыстырылды.

Выводы

Использованный нами метод расчета дифференциального сечения радиационного захвата с использованием феноменологического оптического потенциала позволил корректно описать имеющиеся экспериментальные данные в области резонанса $E = 1058$ кэВ. Результаты экстраполяции S-фактора в область нулевых энергий показал, что полученные нами значения S-фактора согласуются с результатами работы [4], и отличаются от результатов работы [5]. Данная неопределенность в значении S-фактора связана с учетом вклада подпорогового резонанса при энергии $E = -21$ кэВ в нашей работе и в работе [4].

INVESTIGATION OF $^{14}\text{N}(\text{p},\gamma)^{15}\text{O}$ REACTION AT ULTRA LOW ENERGY RANGE

N. Burtebaev, Sh.Sh. Sagindykov, D.M. Zazulin, K.B. Basybekov,
V.P. Burminskii, V.D. Zhazairov-Kahramanov, R.A. Zarifov, R.N. Tohtarov

Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty

The analysis of elastic scattering of protons on ^{14}N nucleus is carried out. The energy dependence of an optical potential parameters is investigated. The differential cross-sections and the S-factor values of reactions $^{14}\text{N}(\text{p},\gamma)^{15}\text{O}$ with usage of a phenomenological potential and new experimental data are computed. The results of calculations are compared with the literary data.

УДК 621.039.75

**ТЕНДЕНЦИИ ИНТЕГРАЦИИ И ПОТЕНЦИАЛ СЕВЕРА РОССИИ
В ПРОБЛЕМЕ ИЗОЛЯЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**¹⁾Комлев В.Н., ²⁾Бичук Н.И., ²⁾Зайцев В.Г., ³⁾Мелихова Г.С., ⁴⁾Павлов В.А.¹⁾Кольский ИЦ РАН,²⁾Комитет по природным ресурсам Мурманской области,³⁾Мурманская геологоразведочная экспедиция,⁴⁾Центрально-Кольская геологоразведочная экспедиция

Изучение вопросов размещения радиоактивных отходов в России показало всю сложность этой проблемы. Из перспективных мест захоронения в качестве наиболее обоснованной площадки для могильника по комплексу условий представляется район Печенги или Норильска.

Важность для России изоляции от биосферы радиоактивных материалов ни у кого не вызывает сомнений. Они сохраняют опасность для человека длительное время, в некоторых случаях десятки и сотни тысяч лет.

Особый статус проблема приобретает в связи со значительными и пока ещё до конца не осознанными общественностью событиями. В России приняты поправки к законодательству, разрешающие импорт зарубежного отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Предстоит общенациональный референдум по этому вопросу. В 2002-2003гг. состоится, скорее всего, референдум Красноярского края о ввозе такого топлива, аналогичные локальные правовые действия планируют в других регионах, в частности в Мурманской области. Сибирский округ Госатомнадзора после скандалов в декабре 2001г., связанных с нарушениями при транспортировке ОЯТ, готов запретить в 2002г. его ввоз в Сибирь. Академик В.И.Осипов считает, что в России и мире очевидны процессы антиустойчивого развития («Геоэкология», 2001г., 6). Известные сентябрьские террористические акты и осложняющаяся ситуация в мире заставили и США, и Россию признать незащищённость всех наземных ядерных объектов и спешно искать в новых реалиях достойные пути развития этой отрасли. Ныне в США установлен мораторий на транспортировку ядерных материалов, а в правительстве РФ обсуждался вопрос о засекречивании таких перевозок. С другой стороны, лишь ядерное оружие объявляется некоторыми СМИ спасательным средством для России против грядущей на долгие годы экспансии Ближнего и Среднего Востока, а также в связи с новой ситуацией нестабильности, обусловленной односторонним выходом США из договора по ПРО и новой ядерной доктриной США. После беспрецедентных по масштабам террористических актов постоянной "головной болью" политиков стало беспокойство по поводу исламского ядерного оружия, а признаки трансформации или снижения роли ядерного сдерживания в политике ведущих ядерных государств отсутствуют. Скорее всего, наоборот, эти события потенциально способ-

ны привести к снижению порога применения ядерного оружия. Исламские террористы проявляют интерес и к радиоактивным отходам как к потенциальному радиологическому оружию. В Баренц-регионе, например, приумножились веские основания беспокоиться за безопасность ядерных объектов России, спроектированных и введённых в эксплуатацию достаточно давно в условиях закрытого общества. Высокопоставленные российские военные вновь и вновь выдвигают версию столкновения "Курска" с иностранной АПЛ в качестве основной причины катастрофы, хотя официально эта версия практически отвергнута. Осмысление этих факторов может заставить изменить позицию даже профессионалов, всю трудовую деятельность посвятивших ядерным технологиям и всегда выступавших за их всемерное применение [1].

Площадки размещения радиохимических комбинатов Минатома вблизи Челябинска, Томска и Красноярска, а также ядерных военных и гражданских объектов Северо-Запада и Дальнего Востока в сороковых и пятидесятых годах ушедшего века выбирали не по принципу наилучших геоэкологических условий. Доминировал фактор геополитический. Но с тех пор многое изменилось. Кроме того, эти площадки недостаточно геологически изучены, т.к. в те годы не было времени и острой необходимости детально оценить их на глубину, а сейчас зачастую "нет средств". Однако в настоящее время уже в соответствии с фактом конкретного расположения производителей радиоактивных отходов (РАО) Минатом вблизи них пытается обосновать варианты подземного захоронения твердых отечественных и зарубежных отходов. Для сравнения, США уже затратили 20 лет и млрд долларов на аналогичный проект YUKA MOUNTAIN (в т.ч. 20 млн долларов на «объяснения» с общественностью), но работы не вышли из предварительной стадии обоснования площадки. Некоторые из захоронений будут по длительности потенциальной опасности соответствовать геологическому масштабу времени. Но, по сути дела, в стране не в должном объеме выполняются работы по геологическому обеспечению

программы изоляции РАО от биосферы. Не было и нет серьезных геологических альтернатив выбранным “оптимальным” вариантам. Геологическую ситуацию по площадкам традиционно закрытых ведомств затруднительно в полной мере и объективно оценить. Некоторое исключение, возможно, составляет Северо-Запад, где такие исследования начаты.

Чтобы иметь основания для минимизации в будущем экологических последствий планируемых захоронений, необходима независимая всесторонняя экспертиза первоосновы – геологических условий выбранных площадок. Одним из начальных этапов при постоянном отсутствии денег на «фундаментальные», как в США, работы и дефиците информации непосредственно по вариантам Минатома (имеющем как объективные, так и субъективные причины) может быть создание и оценка обобщенных моделей выбранных геологических формаций по их аналогам на основе, прежде всего, уже существующих баз геологических данных. Необходимо максимально использовать накопленные в геологии знания. Первый пример такого рода работ – проект Европейской Комиссии “Изучение гидрогеологических аналогов площадок, выбранных для захоронения радиоактивных отходов в России” по заявке BIS/00/004-N от 13.02.2001г. для программы TACIS. Подобные темы не бесполезны также в планах научно-исследовательских работ академических институтов и вузов. В дальнейшем эти модели и оценки могли бы выполнять роль своеобразных спарринг-партнеров при тщательном анализе конкретных условий захоронения РАО. Анализ с целью надежного выявления их “плюсов” и “минусов”. В некоторых случаях они, возможно, приобретут самостоятельное значение. Например, преобразуясь в обоснование более перспективных площадок или дополнительных исследовательских полигонов. Как это происходит на Северо-Западе.

Для Урала, например, хорошо изученными аналогами недостаточно исследованных формаций потенциальных хранилищ и могильников РАО могут быть, вероятно, породы Челябинского и Екатеринбургского метро, Уральской сверхглубокой скважины, рудников и разведанных непромышленных участков горнорудных предприятий, в частности, комбината “Южуралникель” и предприятий по производству меди вблизи Карабаша, железнодорожных и гидротехнических туннелей, а также невос требованных объектов военного и иного специального назначения.

В 1985-1990 гг. Минатом рассматривал вариант единого подземного могильника твердых кондиционированных радиоактивных отходов на Кольском полуострове для Мурманской, Архангельской, Ленинградской и других областей Северо-Запада России, а также Карелии [2]. С другой стороны, в последние годы ушедшего столетия наметилось

сближение интересов и объединение в некоторых случаях финансовых средств ядерного (военного и гражданского) комплекса, а также нефтегазовой и горнорудной отраслей промышленности региона.

В г. Апатиты 15-16 марта 2000г. состоялось международное рабочее совещание по итогам выполнения второй фазы крупного (бюджет второй фазы 3 млн Euro) проекта программы TACIS NUCRUS 95410. В совещании принимали участие Официальный представитель Европейской Комиссии г-н Norbert Jousten, председатель межведомственной экологической комиссии Совета Безопасности России Н.П. Лавров, а также руководители и эксперты программ управления и мониторинга TACIS, Минатома, Госатомнадзора, ведущих в сфере обращения с радиоактивными отходами фирм Франции, Бельгии и России, Администраций Мурманской, Архангельской и Ленинградской областей, Северного Флота, Кольской АЭС, береговых предприятий по обслуживанию военных и гражданских атомных судов в Мурманске и Северодвинске, научных и производственных геологических организаций. На совещании подтвержден официальный статус проекта NUCRUS 95410, отмечен значительный прогресс в развитии работ и принято решение начать подготовку третьей фазы работ – детальное исследование перспективных площадок, выбранных на основе базы данных о полезных ископаемых региона, и проектирование общего для Мурманской и Архангельской областей объекта размещения отходов, включая отработавшее ядерное топливо и реакторные отсеки демонтируемых АПЛ, создание регионального Центра информирования и образования населения по ядерным проблемам.

Одновременно обсуждалось предложение вернуться к совместному рассмотрению радиоактивных отходов всех административных образований Северо-Запада России и к идее Минатома перебазировать содержимое хранилищ Ленспецкомбината “Радон” и Ленинградской АЭС на Кольский полуостров для его окончательного захоронения. Тем более, что на Кольском полуострове вблизи населенных пунктов Печенга, Дальние Зеленцы и Кузрека известны потенциальные площадки для строительства могильника, скальные массивы которых по качеству и степени изученности не уступают своим аналогам на площадках Минатома в Челябинской области и Красноярском крае, а также на площадках ядерных объектов Швеции и Финляндии. В частности, это предложение поддержал бывший директор Ленспецкомбината “Радон”, ныне начальник Сосновоборского отдела Государственного комитета по охране окружающей среды Ленинградской области Е.И. Шлыков. Такому развитию событий по линии TACIS способствовала бы, например, официальная заявка Администрации Ленинградской области (или С-Петербурга, или федерального северо-западного округа РФ) в Европейскую Комиссию,

как это было сделано в 1995г. Администрациями Мурманской и Архангельской областей. Знаменательно, видимо, что почти одновременно с совещанием по проекту NUCRUS 95410 были заключены соглашения о сотрудничестве между Мурманской областью и С-Петербургом, а также соглашение о ядерной безопасности в Баренцевом регионе. Объединение забот Северо-Запада по захоронению РАО и ОЯТ соответствует тенденции создания новых административных связей (Указ Президента РФ от 13 мая 2000г.) и традиционному влиянию С-Петербурга на геологические исследования в регионе. В новой ситуации С-Петербург мог бы взять на себя роль лидера в решении проблемы изоляции РАО и ОЯТ для Северо-Запада в целом. По аналогии с лидерством компании “Росредмет” (С-Петербург) в частной задаче захоронения в Мурманской области РАО комбината “Севредмет”. Окончательное решение по удалению РАО и ОЯТ от “стен” Великого города было бы хорошим подарком к его 300-летию.

Губернатор Ю.А.Евдокимов при весомых гарантиях и компенсациях не исключает возможность приема Мурманской областью РАО и ОЯТ со стороны (Мурманское телевидение, программа “Панорама недели” от 8.04.2000г., посвященная итогам визита Президента России В.В.Путина в Мурманскую область), или, как минимум, использование Мурманска в качестве важного промежуточного звена специализированной транспортной схемы (“Панорама недели” от 1.07.2000г.). Как считает Официальный представитель Европейской Комиссии г-н Н.Жустен, в настоящее время имеются серьезные предпосылки для сотрудничества с Россией в сфере обращения с РАО и ОЯТ и существует определенное количество доноров, готовых вложить свои средства в развитие такого рода работ. Нужны перечень предложений, возможность выбора и уверенность в том, что финансироваться будут действительно стоящие, хорошие проекты (протокол и решение совещания по программе TACIS от 15-16 марта 2000г., подписанные вице-президентом РАН Н.П.Лавровым и зам. министра РФ по атомной энергии В.А.Лебедевым).

Подходящие геологические объекты, в т.ч. гнейсо-гранитные купола и массивы гранитов рапакиви на северном побережье Ладоги, известны и на территории Карелии (которая соединяет все “ядерные” области Северо-Запада, включая Ленинградскую, и граничит с использующей ядерные технологии Финляндией). Через Карелию осуществляли и будут осуществлять транзитные перевозки РАО и ОЯТ. Республика “имеет” именную АПЛ. Карелия потребляет электроэнергию Кольской и Ленинградской АЭС. Наконец, военные и гражданские ядерные технологии - дело общегосударственное. Поэтому, даже при отсутствии стационарных ядерных объектов на территории Карелии, она должна

понимать заботы соседей. Целесообразна специализированная оценка геологических формаций по крайней мере Беломорского, Кемского и Лоухского районов или их прибрежных частей. Вопреки мнению большинства, сторонники “ядерного” статуса Карелии в республике есть (“Север”, № 9, 2000г.). «Неядерные» отрасли хозяйства не обогрели жителей Медвежьегорского района зимой 2001-2002г.г. Вновь и вновь власти Карелии возвращаются к вопросу о строительстве в республике АЭС. Генеральный менеджер проекта NUCRUS 95413 г-н Ж.-М. Потье считает, что дальнейшую работу по площадкам на Северо-Западе нужно продолжить применительно к двум геологическим объектам (протокол и решение совещания по программе TACIS от 15-16 марта 2000г.). Один из них – в Мурманской области, другой – в Архангельской. По данным проекта NUCRUS 95410 наилучшая площадка Архангельской области (базальты горы Шапочка) находится на границе с Карелией, является самой южной площадкой из рассмотренных и гораздо ближе к Петрозаводску, чем к Мурманску. Возможный вариант действий местных экологов и геологов на ближайшее будущее: заявка в Европейскую Комиссию, в Комитет по природным ресурсам Карелии или в экологические фонды на финансирование работ по исследованию площадки Шапочка, т.к. это напрямую связано с экологической безопасностью республики.

Геологи Минатома в развитие работ по программе TACIS имеют все основания в соответствии с протоколом совещания от 15 -16 марта 2000г. подать заявку в Европейскую Комиссию или куда-либо еще на доизучение своей площадки Дальние Зеленцы, которая проектом NUCRUS 95410 (Task 7) признана одной из самых перспективных. Минатом входит в число заявителей и исполнителей предыдущих стадий проекта NUCRUS 95410, а также организаторов (ВНИПИЭТ, С-Петербург) планируемой завершающей фазы (запрашиваемый бюджет 5 млн. Euro).

Целесообразно усиление роли Минатома при международных оценках площадок Северо-Запада. В противном случае возможна ситуация неадекватных российской действительности выводов и предложений. Как это произошло, например, при определении целей, задач, структуры и стоимости исследований применительно к геологоразведочным работам с поверхности и гипотетическим подземным лабораториям для изучения условий захоронения радиоактивных отходов в аргиллитах, многолетнемерзлых известняках и обычных скальных породах Северо-Запада России (NUCRUS 95410. Task 4,5), когда даже не обозначен опыт реально создаваемых Минатомом аналогичных объектов на Новой Земле и на площадке ПО “Маяк”, действующих подземного комплекса Красноярского ГХК и объектов Билибинской АЭС, натурных исследова-

ний в связи с предложением ВНИПИЭТ размещать ядерные материалы в глинах Ленинградской области, с подземным ядерным взрывом "Агат" в Архангельской области и взрывами в Хибинах, а также другими взрывами - в условиях мерзлоты, а в списке рекомендуемых для выполнения будущих работ организаций отсутствуют головные институты - ВНИПИпромтехнологии и Радиевый. Между тем ВНИПИпромтехнологии, ВНИПИЭТ, ВНИИЭФ, Радиевый институт и другие организации Минатома уже сотрудничали с Горным институтом КНЦ РАН в рамках направления "Подземные АС" госпрограммы "Экологически чистая энергетика". ВНИИЭФ (В.П.Зоммер, 1992г.), московское отделение института "Атомэнергопроект" (письмо № 0225/144 от 06.03.92г.) и НПО "Энергия" (письмо № 25215/779 от 28.02.92г.) были готовы участвовать и в исследованиях по тематике региональной могильника на Кольском полуострове, а Координационный НТС Минатома (факс пред. КНТС Л.Н.Лазарева от 03.03.98г.) проявил интерес к этой тематике.

Впрочем, Кольский полуостров и Карелия могут стать лишь промежуточными территориями при транзите РАО Северо-Запада и ОЯТ реакторов РБМК в Сибирь по Северному морскому пути и рекам Енисей и Обь, например в район Красноярска ("Полярная правда" от 21.03.2001г.). Минатом уже разрабатывает идею совместного захоронения именно в Красноярском крае отходов и топлива Красноярского горно-химического комбината, Сибирского химического комбината, ПО "Маяк" и других предприятий (проект 1491 Международного научно-технического центра). Не исключена передислокация в Красноярский край и отходов ядерных объектов других регионов и других стран. Этот вариант позволит Минатому через опережающий комплекс хранилищ РАО и ОЯТ создать предпосылки для достройки и развития чрезвычайно важного для него завода РТ-2 ("Атомная хроника России", №2, апрель-май 2000г.). Версия о возможном вывозе, по крайней мере наиболее опасных РАО, за пределы Северо-Запада косвенно, видимо, поддерживается МАГАТЭ, т.к. с одобрения Консультативной экспертной группы этой организации международный консорциум (фирмы Германии, Швеции и Норвегии) рассматривает захоронение в регионе в многолетнемерзлых известняках Новой Земли только отходов с низким и средним уровнем активности ("Бюллетень МАГАТЭ", т. 42, № 3, 2000г.). При таком развитии событий для запасных и компромиссных вариантов размещения общегосударственного комплекса хранилищ, на случай резких возражений Красноярска и осложнений при международной экологической экспертизе по вариантам Новой Земли или Кольского п-ва, не исключено рассмотрение территорий полуостровов Ямал ("Тюменская правда сегодня" от 15.05.99. и 10.07.99.), Таймыр и других,

примыкающих к середине Северного морского пути (например, Югорский п-в, Полярный Урал и Воркутинский промышленный район). Кроме того, если Минатом аргументированно борется за дорогостоящий, сопоставимый в денежном выражении с российским бюджетом в целом, международный рынок услуг по переработке ОЯТ, то почему следует исключить вероятность возникновения со временем конкуренции среди регионов России в сфере выгодного предоставления территории для изоляции РАО, когда стоимостная емкость международного рынка таких услуг много больше отечественного бюджета? Возникают же версии о завозе ОЯТ за хорошие деньги на Чукотку ("Новая газета", № 6, 2001г.), на один из островов Курильской гряды ("Атомная хроника России", №3, 2000г.) или в Мурманск ("Полярная правда" от 21.03.2001г. и "Мурманский вестник" от 25.05.2001г.). Конкуренция между Мурманском (Мурманское морское пароходство) и Красноярском (краевая Администрация, Енисейское речное пароходство и "Норильский никель") за право, например, влиять на транспортировку с помощью атомных судов грузов по Северному морскому пути уже зарождается ("Мурманский вестник" от 4 и 5 октября 2000г. и «Полярная правда» от 12.07.2001г.). Впрочем, например, бывший директор Мурманского РТП "Атомфлот" видит опасность концентрирования ОЯТ в Мурманске и не хочет "добавлять радиации Мурманску" за счет чужого топлива ("Мурманский вестник" от 1.03.2001г.). С другой стороны, председатель Мурманской областной думы П.А. Сажин не доволен законом о реабилитации радиационно загрязненных территорий за счет денег от импорта ОЯТ. Вся помощь - регионам будущего размещения зарубежного топлива. Мурманской и Архангельской областям, Приморью этот закон ничего не дает (Мурманское телевидение от 2.07.2001г.).

С приходом к власти в январе 2001 года новых губернаторов Тюменской области и Долганско-Ненецкого округа на Ямале и Таймыре еще более укрепились позиции крупного северного бизнеса, следовательно, и принцип выгоды. Таймыр - самая северная континентальная территория России, расположенная в том же диапазоне географической широты, что и Новая Земля. Варианты Полярного Урала, Ямала и Таймыра по геологическим условиям не хуже, но они дешевле Новой Земли применительно к изоляции РАО. Рейтинг Полярного Урала, Ямала и Таймыра может резко возрасти, поскольку их близкий аналог - Новая Земля - на сегодня является официальным приоритетом Минатома на севере и работы по ней доведены до проекта. В условиях существования общепринятого в мировом сообществе мнения о глобальном потеплении климата (документы "Рио-92", "Киото-97", "Бонн-01", «Марракеш-01» и «Рио+10») варианты размещения РАО на Новой Земле в "вечной" мерзлоте на международном уровне

постоянно будут мощным раздражающим антиядерным фактором. Пример- резкое осуждение по этой причине варианта Новой Земли представителями США и Норвегии на конференции «Европейская политика в области безопасности и охраны окружающей среды» в Киркенесе(«Полярная правда» от 26.09.2001г.). В принятой в конце 2001г. Стратегии обращения с РАО и ОЯТ Мурманской области нет упоминания о Новой Земле, тем более о безальтернативности и приоритетности этого варианта в еще предстоящем, как зафиксировано в Стратегии, выборе места размещения регионального могильника. ЛЕНМОРНИИПРОЕКТ выступил с предложением создать на Южном острове архипелага крупный многофункциональный порт - основу нового этапа развития Севморпути. И власти Архангельской области, похоже, «работают» на запрещение реализации мерзлотной концепции («Кировский рабочий» от 6.09.2001г.). Это не в интересах Минатома. Министр А. Ю.Румянцев уже начал сомневаться в целесообразности варианта Новой Земли (www.nuclearno.ru от

1 и 16.07.2002г.). Минатом вынужден будет переходить из этого неустойчивого и неприятного состояния к чему-то более надежному: либо к вариантам площадок Кольского полуострова или Карелии с положительным температурным полем пород, либо к более “мерзлой” мерзлоте. Хотя, например, аналогичную резко отрицательную позицию в проблеме занимают геологи и криологи и Тюмени. И в любом случае – к породам более высокого инженерно-геологического качества, нежели известняки Новой Земли. Реакторные отсеки АПЛ, которые первоначально также хотели размещать на Новой Земле, уже точно будут размещены на материке. При необходимости, в т.ч. из-за соблюдения норвежских (европейских) интересов по обеспечению экологической безопасности рыбных запасов и добычи углеводородов в Баренцевом море, варианты размещения объекта по изоляции РАО могут смещаться на восток и проектные проработки адаптироваться к другим районам многолетней мерзлоты.

Таблица 1. Этапы исследований по обоснованию перспективных площадок для планируемой долговременной изоляции в будущем твердых радиоактивных отходов в России (действующие временные хранилища РАО и ОЯТ Минатома, ВМФ, “Радона” и др. не рассматриваются)

Годы	Финансирование	Исполнитель	Территория
До 94	Минатом	ВНИПИпромтехн.	Юж. рег., в т.ч. Астраханск.обл.
85-90	Минатом	Тот же, ВНИПИЭТ	Кольский п-в
85-88	Минатом	МГРЭ, ЦКГРЭ	Кол. п-в, р-н п.Д.Зеленцы
89-91	Минатом	Горн. и-т КНЦ РАН	Кольский п-в
93-95	Европ. Союз	Тот же и DBE	Кольский п-в
96-00	Европ.Союз	Гои,SGN, Belgatom	Кол.. п-в, Арх.обл., аркт. о-ва
С 03	МНТЦ	ВНИПИпромтехн.	Н.Земля,Чукотка,Д.Восток
93-96	Мин. Обор.	ВМФ	Берег. подз.выработки флотов
99-02	МНТЦ	НПО “Звездочка”	Кол. п-в, Арх. обл., аркт. о-ва
91-02	СКВ, ЮНЕСКО	“Недра”, “К.Сверхгл.”	Р-н Кольск. свержгл. скважины
С 95	МНТЦ	Те же и ВНИПИПТ	Р-н К-й свержгл. скважины
91-00	Минатом, Ленин.обл.	Радиев. ин., ВНИПИЭТ	Ленинград. обл., р-н п.Копорье
99-00	Комп. “Росредмет”	Комбинат “Севредмет”	Р-н п. Ревда, Мурманская обл.
93-96	Минатом, МО	ВНИИЭФ, НИИ МО	Арх. Н.Земля, действ.пол.яд.исп.
С 91	Минатом, МНТЦ	ВНИПИпромтехн.	Арх.Н.Земля, бывш.пол.яд.исп.
С 99	Европ.Союз	Ф. Герм., Швец., Норв.	Арх.Н.Земля, бывш. пол.яд.исп.
85 - 00	Минатом	ВНИПИпромт., ИГЕМ	ПО “Маяк”, Челябинская обл.
С 93	Минатом, МНТЦ	Радиев. Ин., ВНИПИПТ	Красн. кр., Нижнекан. массив
С 99	Минсудпром	Завод “Нерпа”	Р-н п. Сайда-Г., Мурман. обл.
С 99	Минатом	МКЦ “Нуклид”	Судор.зав. М.и Ар.обл.,Д.Вост.

Ямал, например, имеет выгодное географическое положение и оптимальную транспортную схему (железнодорожную, речную, морскую) относительно производителей РАО Екатеринбурга, Челябинска, Томска, Новосибирска и Красноярска, а также Дальнего Востока, Северо-Запада, Европейской России, Украины и Казахстана. Его условия оптимально отвечают “мерзлотной” концепции Минатома по изоляции РАО. Эти преимущества во многом относятся и к Полярному Уралу, а также к Норильску. Пик запасов и развития нефтегазовой отрасли севера Тюмени уже позади. На прилегающих территориях, в основном между реками Обь и Енисей, выполнено около 10 подземных ядерных взрывов,

т.е. имеется положительный опыт подземной изоляции РАО даже с помощью наиболее опасной технологии. В Тюменской области в 1999 году начала действовать Биологическая станция Института экологии им. Северцова РАН, основная функция которой – отслеживание радиологической ситуации в бассейне Оби. Ямал включен в состав “ядерного” Уральского федерального округа, а новый губернатор Тюменской области С.С. Собянин – бывший первый заместитель представителя Президента РФ в УрФО. Для Ямала прогнозируют финансовое банкротство (“Правда Тюмени” № 1 и 2 за 2001г. и “Вечерняя Тюмень” № 5, 2001г.). В целом социально-политическая и экономическая ситуация в северных

регионах Северо-Западного, Уральского и Сибирского федеральных округов во многом схожа.

Проект NUCRUS 95410 (1996-2000 гг., таблица 1) отражает наиболее полные и комплексные сравнительные исследования в России применительно к альтернативным территориям крупного региона. К сожалению, в нем недостаточно рассматривают площадки Печенгского района Мурманской области. Отчасти это вызвано ограничениями, которые были установлены Европейской Комиссией в 1994-1995 гг. при формировании задач второй фазы проекта (не рассматривать ОЯТ, военные РАО, территории вблизи мест добычи полезных ископаемых и военных баз). Если это не сознательная ориентация на вывоз наиболее опасных РАО за пределы региона, то похожую ошибку после 1999г. в "начале пути" совершает ныне независимый от NUCRUS 95410 консорциум фирм Германии, Швеции и Норвегии, рассматривая только РАО низкой и средней активности ("Бюллетень МАГАТЭ", т. 42, № 3, 2000г.). Однако дополнительный анализ с учетом изменившегося при оценке результатов второй фазы проекта NUCRUS 95410 мнения официальных лиц Европейской Комиссии позволил выявить важные положительные аспекты ситуации (экономический, политический, научный и стартовых условий), которые побуждают вернуться к рассмотрению этого района с позиций перспективных территорий.

Экономический аспект. Здесь проявляются и могут совпадать интересы ядерного, нефтегазового и горнорудного комплексов. Следовательно, появится возможность задействовать новые экономические методы решения проблемы (подробней см. [3-7]). Если прошлый век для Мурманской области был "горнорудным" и "ядерным", то будущее региона будет определяться нефтегазовой отраслью. Российские нефтяные компании "Лукойл", "ЮКОС", "Сибнефть" и ТНК видят Мурманск в качестве "окна в Америку" при реализации своих планов по освоению заокеанского нефтяного рынка. Предстоят углубленный технико-экономический анализ и презентация проекта в США. И радиоактивное "наследие" не должно быть этому помехой. Лицензию на освоение площадки (прежде всего, на проведение геологоразведочных работ) в Печенгском районе имеет право получить не только комбинат "Печенганикель". Строительство будет начато не "с нуля", поэтому возможна существенная экономия на капитальных затратах по сравнению с другими вариантами. Региональная цена вопроса – деньги, которые реально могут работать в регионе: 1.5 млрд долл. ("Мурманский вестник" от 1.03.2001г. и 15.05.2002г.), до 5 млрд долл. ("Кольское слово" от 21.03. 2001г.), 6 млрд долл. ("Новая газета", № 6, 2001г.). Известный на сегодня «потолок» аналогичных проектов (YUCCA MOUNTAIN) – 60 млрд долл.). Россия стоит на пороге обоснования и создания за западные деньги такого (под "потолок")

крупного международного подземного хранилища (хранилищ) РАО и ОЯТ. Так считают многие участники прошедшей в сентябре 2002г. в Москве международной конференции "Обращение с облученным ядерным топливом 2002: новые инициативы России". Определена и страховка на случай аварии – 10 тысяч долларов на контейнер с ОЯТ ("Панорама недели" от 26.05.2001г., Н.С. Яновская). Хранилище или могильник РАО (ОЯТ) в регионе – объект долговременной эксплуатации и экономически выгодный, т.к. в будущем устойчивая крупномасштабная энергетика возможна только на основе ядерной ("Энергия", № 1, 2001г.).

Политический аспект. Печенгский район является приграничным, он большей частью доступен иностранцам и интересен им. Возможная обеспокоенность соседей, Норвегии и Финляндии, таким вариантом размещения регионального могильника полезна. Значит, будут контроль и помощь Запада, а в конечном итоге – объект международного уровня по качеству научных, технических и технологических решений. Тем более, что скоро электроэнергия Кольской АЭС будет поставляться в скандинавские страны (www.kolsky.ru). Норвегия, обеспечив наивысший в мире уровень качества жизни, в основном за счет нефти и газа шельфа, позволяет себе спонсировать программы ядерной и радиационной безопасности на Северо-Западе России. В регионе функционирует система аварийно-спасательных работ (спасательно-информационные центры в Будё и Мурманске). Российские природоохранные организации протестуют против поддержки Норвегией планов строительства нового хранилища ОЯТ на ПО "Маяк", целью которой является перемещение источника радиационной опасности от норвежской границы. Но реально опасность для Норвегии при этом увеличивается. И это понимают, например, представители «Беллуны», считая утилизацию РАО и ОЯТ непосредственно на Кольском полуострове предпочтительной (www.chel.yabloko.ru от 9.01.2002г. и «Атомная Арктика», доклад «Беллуны», 2001г.). Печенга полностью соответствует критериям, предъявляемым «Беллуной» в этом докладе относительно выбора площадок для размещения РАО и ОЯТ именно на Кольском полуострове. Кроме того, не учитывая мнение населения и администрации Челябинской области, Норвегия способствует нарушению демократических процедур в России ("Атомная хроника России", №1, 2000г.). Швеция по отношению к Печенге может быть не только лояльной, но и заинтересованной стороной. Печенгский район непосредственно с ней не граничит, но в силу близости территорий друг к другу шведские деньги и технологии (а, возможно, и РАО) будут испытывать притяжение России. Муниципалитет шведского города Тьерп проголосовал против постоянного размещения ОЯТ по соседству (www.nuclear.ru от 9.04.2002г.). В части технологий такая тенденция

соответствовала бы позиции Минатома, т.к. бывший директор ВНИПИпромтехнологии О.Л.Кедровский и др. призывают адаптировать шведский опыт подземного захоронения всех типов отходов для различных объектов России [8]. Общими усилиями тогда возможно создать образцово-показательный объект - "козырь" для Минатома на долгие годы. В том числе и с участием российских нефтегазовых компаний. Отечественные РАО времен гонки вооружений – "достижение" интернациональное. И выход из тяжелой ситуации Россия не должна искать в одиночестве. Например, затраты на подъем АПЛ "Курск" оценивают величиной порядка 80 млн долларов. Больше половины этих денег выделил бы Запад. Правительства ряда стран готовы были внести деньги на поднятие подлодки, однако настаивают на выполнении определенных условий. Главное из них – операция по подъему "Курска" должна была стать началом долговременной международной программы по очистке территориальных вод России от ядерных отходов. В этом заинтересованы и Евросоюз, и западные компании, которые в такой ситуации надолго обеспечат себя работой ("Полярная правда" от 14.03.2001г.). Где, как надежно и за какие деньги должны быть размещены дополнительные РАО на суше, поднятые с целью обезопасить Европу и дать работу ее гражданам со дна Баренцева и Карского морей? Еще пример: по мнению членов Совета по внешней и оборонной политике при Президенте РФ часть внешнего долга России могут списать в обмен на реализацию на Кольском полуострове экологических программ с целью повысить безопасность Европы ("Полярная правда" от 11.04.2001г.). Около границы общественность, прежде всего зарубежная, совершенно определенно не позволит построить по сути дела геологического масштаба времени объект в виде "временки" из "дешевых" наземных сооружений, как это видится иногда экспертам ТАСИС из теплых стран применительно к другим районам региона или как это было предусмотрено московскими экспертами в ТЭО ВНИПИпромтехнологии для Новой Земли. А финансовая помощь Запада будет более устойчивой (накопительная площадка для временного хранения ОЯТ в Мурманске не сдана в срок из-за угрозы США пересмотреть в сторону уменьшения ранее принятые этой страной обязательства по затратам. Н.С.Яновская, Мурманское телевидение от 14.09.2001г.). Кроме того, строится же вопреки возмущениям России достаточно близко от российско-норвежской границы (50км) стратегически неприятный нашей стране локатор противоракетной обороны США, а вблизи Кольского залива патрулируют иностранные АПЛ, следствием чего являются факты столкновения их с российскими АПЛ. Проблема столкновений АПЛ, которые происходили только у берегов России, официально признана НАТО ("Мурманский вестник" от 28.11.2000г.). В портах

Норвегии отдыхают и проходят техническое обслуживание американские АПЛ, выдвинутые к берегам России. К усилению военного присутствия на севере Норвегии призывают губернаторы трех северных провинций этой страны ("Мурманский вестник" от 18.01.2001г.). Известны тенденции интернационализации российского сектора Северного Ледовитого океана и факты выдворения российских рыболовецких судов из зоны их традиционного промысла норвежскими военными кораблями. Претворяются в жизнь планы милитаризации Норвегией (НАТО) Шпицбергена и вытеснения с архипелага России ("Полярная правда" от 11.04.2001г.). Между Россией и Норвегией существует спор о принадлежности богатейшей Федынской нефтегазовой структуры. Норвегия уже вкладывает деньги в обеспечение ядерной и радиационной безопасности Кольской АЭС и наземных объектов Северного флота. Как показал август 2000 года, в будущем, видимо, и в море Северному флоту иностранная помощь не помешает. Норвегия не только тратится, но и зарабатывает в связи с ядерными проблемами России. Печенга позволит быстро перейти от затянувшихся и противоречивых обсуждений вариантов "спасательной операции" в части региональных РАО и ОЯТ (см. таблицу 1) к надежному делу. Имеются и другие мотивы для зарубежной помощи. Существует финансируемая Западом программа "Печенгская стратегия выхода", направленная на осуществление малых и крупных проектов развития региона на основе экономического сотрудничества между северными провинциями Финляндии (Лапландия), Норвегии (Финнмарк) и Печенгским районом. При этом провинции Лапландия и Финнмарк являются глубоко дотационными в своих странах и создание новых рабочих мест для их населения идет во многом в связи с процессами в Мурманской области (например, в связи с переключением потока добываемой российскими рыбаками рыбы, а также заказов на судоремонт и судостроение из Мурманска в Норвегию). Среди крупных совместных проектов – реконструкция комбината "Печенганикель" (почему бы не рассмотреть дополнительные направления реконструкции?), развитие порта Лиинахамари и современной инфраструктуры пересечения границы (финский и норвежский "транспортные коридоры" из Европы через Лотту и Борисоглебск). Экономика Печенгского района на 90% связана с деятельностью комбината "Печенганикель" ("Полярная правда" от 24.10.2000г.). Депрессия Печенги из-за возможных сокращений производственных мощностей комбината "Печенганикель" если не усугубит непростое положение северных провинций Финляндии и Норвегии, то совершенно точно лишит их надежд на "Печенгскую стратегию выхода". Печенгский район – самый милитаризованный на Кольском полуострове. Он единственный в РФ граничит со страной, которая является членом НАТО ("Полярная правда" от

24.10.2000г.). Однако, российские военные программы сокращаются. Уже сейчас более 15 процентов трудоспособного населения района - безработные (наивысший показатель по области). Специалисты Минатома считают объекты ядерной энергетики стратегическим фактором, сдерживающим или ограничивающим применение военной силы, а Израиль, учитывая конкретное противостояние, разместил такой объект вблизи границы с Египтом ("Энергия", №7, 2000 г.). Исторические параллели на темы взаимопомощи и противостояния – см. также ж. "Север" №10, 2000г. и г. «Экономика и время» от 18.06.2001г. При определенных условиях не исключены территориальные претензии Финляндии относительно Печенгского района (С.Н. Дащинский, Мурманское телевидение, 22.03.2001г. и ж. "Север" № 11, 2000г.).

Стартовые условия. Геологические формации Печенги детально изучены. Существует минимально необходимая производственная инфраструктура, в т.ч. открытые и подземные горные выработки. Недалеко, в Западной Лице, с норвежской помощью по западным стандартам реконструируют мощности по обращению с РАО и ОЯТ. Развита комплексная транспортная сеть (автомобильная, железнодорожная и морской порт). Завершается строительство международной автотрассы от государственной границы к Мурманску через поселок Приречный. Несанкционированный доступ посторонних лиц в Печенгский район уже сейчас исключен в силу пограничного режима. Никельский пограничный отряд может получить экономически выгодный охраняемый объект, а значит - поправить материальное обеспечение Арктического управления погранвойск ФПС России. Территория вблизи «Печенганикеля» доступна для официальных поездок иностранцев, в то время как инспекционное посещение в связи с международными проектами мест размещения РАО и ОЯТ около баз флота представителями стран-доноров затруднено. Последний инцидент – запрет осмотра принцем Майклом Кентским хранилища реакторных отсеков в Сайда-Губе по требованию Министерства обороны РФ уже в ходе его визита в июне 2001г. в Мурманскую обл., хотя вся программа визита была согласована заранее, в т.ч. с военными, и на строительство хранилища Великобритания выделила значительные деньги. "Норильский никель" все равно когда-то закончит или резко ограничит горные работы на Печенге (в свое время достаточно быстро закончилась никелевая руда вблизи "Североникеля"). Не исключено в ближайшие годы высвобождение некоторой части горных мощностей и людских ресурсов комбината "Печенганикель". Условие стабильной работы «Печенганикеля»-большая доля альтернативного сырья. Пессимистично оценивают будущее населенных пунктов, связанных с "Норильским никелем", эксперты Центра стратегического развития "Северо-

Запад" ("Хибинский вестник" от 18.04.2001г.). Аналогично смотрят на перспективы кольских месторождений на фоне мировых тенденций в никелевой отрасли и специалисты ВИМСа («Разведка и охрана недр», 11-12, 2001г.). Минерально-сырьевая база «Норильского никеля» (сульфидные медно-никелевые руды) резко отличается от таковой за рубежом. Силикатное зарубежное сырье более «удобно» с точки зрения добычи и переработки. Это предпосылки хронических проблем. Прежде всего беспокоит будущее горных работ вблизи п. Никель. Не зря же один из бывших лидеров на международном рынке никеля и меди – финская компания "Оутокумпу" –практически свернула свое производство этих металлов, отказалась от сотрудничества при строительстве нового подземного рудника комбината "Печенганикель" и развивает другие виды бизнеса. А следом за ней и "Норильский никель" часть своих средств, прогнозируя будущие трудности с цветными металлами, вкладывает, например, в производство стали ("Полярная правда" от 22.07.2000г.). "Норильский никель", кроме того, приобретает крупные месторождения в Австралии и на Новой Земле. Собственностью норильского гиганта стала красноярская компания "Полус", один из крупнейших российских производителей золота. Юридически "Печенганикель" уже покинул Печенгу. С образованием Кольской горно-металлургической компании (зарегистрирована в Мурманске) Печенгский район потерял основного налогоплательщика и стал дотационным. Принято решение перебазировать администрацию Кольской ГМК в 2002г. еще дальше от Печенги – в Мончегорск. Аналогичные обстоятельства применительно к некоторым площадкам федерального ядерного полигона инициировали в свое время вариант размещения могильника на арх. Новая Земля, бесперспективность которого (прежде всего по факторам затрат и безопасности) доказана ныне проектом NUCRUS 95410. Кроме того, Печенга может обеспечить основу для компромисса позиций ряда отечественных и зарубежных организаций, выполнявших исследования по разным направлениям и зачастую в условиях конкуренции [3-7]. Прогнозируемое время работы оставшихся рудников комбината "Печенганикель" составляет 5,10 и 15 лет даже при благоприятном уровне мировых цен на никель и при благополучном разрешении для "Норильского никеля" очередных трудностей в связи с претензиями государства к владельцам концерна из-за, например, заниженной на 140 млн. долл. цены в процессе его приватизации или из-за проблем с налогами (информационные программы центрального телевидения от 30.11.2000г.). В последнее время ситуация на рынке никеля резко и на долгую перспективу ухудшилась. Кольскую горно-металлургическую компанию ожидают серьезные убытки ("Полярная правда" от 24.11.2000г. и

“Мурманский вестник” от 24.10.2001г.). Если сбываются прогнозы о снижении цен на Лондонской бирже на цветные металлы и о повышении тарифов на электроэнергию, то уже с 2001г. «Печенганикель» предполагали нерентабельным (ген. директор «Печенганикеля» И. Блатов, «Панорама недели» от 14.07.2001г.). Родственное предприятие – ОАО «Уфалейникель» полностью остановлено по этим причинам («Энергетика и промышленность России», ноябрь 2001г.). Ситуация с поступлениями в бюджет области обострилась (пресс-конференция Ю.А.Евдокимова 24.09.2001г. и «Мурманский вестник» от 17.10.2001г.). Стратегия экономического развития Мурманской области до 2015г. («Мурманский вестник» от 16.01.2002г.) устанавливает Кольской ГМК, единственному из крупных предприятий области, нижний предел спада производства на собственной сырьевой базе, требуя обеспечить загрузку не менее 50% мощностей по выпуску никеля, меди и кобальта своим сырьем. Прогнозируемое время работы рудников существенно меньше сроков стабильного функционирования объектов размещения радиоактивных материалов: 100 – для реакторных отсеков АПЛ, 300 – для кондиционированных РАО низкой и средней активности и 10000 лет – для ОЯТ. Кроме того, имеются уже выведенные из эксплуатации горные выработки и непромышленные разведанные участки. Резервный вариант развития предприятий “Норильского никеля” на Кольском полуострове связан с хромитами и с титановым сырьем, с “раскручиванием” горных работ “с нуля” вне Печенги. Но на этом проблемном по качеству сырья, затратам и технологиям пути Кольская ГМК дополнительно вступает в противоречие с интересами другого «гиганта» – ОАО «Апатит», а также нарождающегося горнопромышленного комплекса Карелии. В ноябре 2001г. в Кольской ГМК произошла смена лидера. Генеральным директором компании вместо технолога стал банкир. Администрации Мурманской области и “Норильского никеля” благодаря новой долговременной функции подземных мощностей комбината “Печенганикель” могли бы снять с себя груз забот по противодействию процессам формирования депрессивного горнопромышленного района. «Печенганикель» может полезно замещать не только подземные мощности, но и металлургические, имея в виду ФЦП «Переработка и утилизация металлических радиоактивных отходов». Например, администрация закрытого территориального образования Островной (Гремиха) связывает с предприятием Минатома по обращению с РАО и ОЯТ “СевРАО” будущее наидепрессивного ныне города Мурманской области (“Полярная правда” от 20.12.2000г. и от 22.06.2001г.). А администрация «Норильского никеля» могла бы получить весомый аргумент в конкурентной борьбе с «Лукойлом» за транспортные активы Северного морского бассейна. Впрочем,

“Норильский никель” скоро прекратит существование как юридическое лицо (“Мурманский вестник” от 29.11.2000г.). Это тоже отражение назревших трудностей. Лишь в конце июля 2000 года со стороны рудного борта из Ждановского карьера начата проходка штольни для вскрытия горных выработок нового подземного рудника комбината “Печенганикель”. Почему бы с противоположной стороны, в породных массивах, не начать обустривать вход в подземное хранилище отходов, выиграв аналогично строительству подземного рудника несколько сотен метров глубины и время? Примеры аналогичного подхода – размещение за рубежом хранилищ и могильников РАО с использованием горных выработок бывших рудников – известны (Стрипа, Конрад, Морслебен и другие). “СевРАО” до 2006 г. планирует выгрузить ОЯТ из более чем 70 АПЛ отстоя, после чего подойти к разгрузке береговых технических баз (“Полярная правда” от 20.12.2000г.). Куда перебазировать ОЯТ баз при таком жестком отсчете времени? Победа на выборах губернатора Красноярского края Александра Хлопонина приведет к переориентации основных потоков “Интерроса” в Красноярский край. В этой связи, Мурманская область в 2003 году может лишиться финансовых поступлений от “Норильского никеля”, осуществляемых в рамках ежегодных договоренностей между компанией и Мурманской областью. Не исключено, что и сама компания полностью будет переориентирована на производство в Красноярском крае. Тем более, что Красноярский НИИ геологии и минерального сырья работает над проблемой выявления нового медно-никелевого объекта, по потенциалу сопоставимого с норильскими месторождениями, в пределах Канского зеленокаменного пояса. Таким образом, вновь встает вопрос о будущей судьбе предприятий “Норильского никеля” в Мурманской области (diviky.narod.ru). Аналогичный подход к захоронению РАО, но применительно к использованию инфраструктуры и зоны отчуждения Чернобыльской АЭС, отстаивает академик НАН Украины Э.В. Соболевич. “Казатомпром” подготовил проект использования для этой же цели площадок бывшего полигона в Семипалатинске.

Научный аспект. Разнообразные геологические условия Печенги и научная инфраструктура уникальны и могут не только обеспечить надежное решение проблемы изоляции РАО и ОЯТ для северо-западного региона, но и содействовать обоснованию аналогичных объектов для других регионов России и для других стран. Здесь компактно, на небольшой территории сочетаются геологические условия большинства российских и зарубежных проектов такого рода. В том числе содействовать, возможно, в виде некоего гражданского аналога и независимо международному параллельному контролю оценок безопасности российских (Челябинск, Красно-

ярск) проектов захоронения РАО, доступ к информации по которым объективно затруднен.

Мировая практика подземной изоляции РАО и ОЯТ предусматривает поэтапный подход. На первом этапе выполняют пилотный проект – создают подземную исследовательскую лабораторию, с помощью которой отработывают безопасную технологию обращения с отходами и детально изучают породные массивы. Второй этап - строительство крупного производственного объекта с региональными или общегосударственными функциями.

В России рассматривают возможность заложения трех таких лабораторий. На площадке ПО “Маяк” (Челябинская область, проектирование), на территории Нижнеканского массива (Красноярский край, предпроектные исследования) и где-либо на Кольском полуострове (предпроектные исследования) [9]. Первое конкретное предложение о месте Кольской подземной лаборатории – Хибин [10]. Аргументы в пользу альтернативного (дополнительного) регионального варианта (Печенга):

- Имеются горные выработки;
- Хорошая геологическая изученность;
- В Центральном блоке Печенгской структуры в соответствии с объемной моделью В.В.Паничева, В.Н.Иванченко, В.А.Мокроусова и др. (1995г.) до глубины 2 км при масштабе работ 1:50000 выделены структурные блоки третьего порядка с линейными размерами, как правило, не менее 2 км, которые заложены в пределах свит материк и ждановская, а также серий от колосйокской до ахмалахтинской;
- Благоприятные гидрогеологические и геодинамические условия;
- По сообщению А.В.Ловчикова (сентябрь 1999г.), Печенгская структура медленно опускается, следовательно нет предпосылок опасаться в будущем выноса РАО и ОЯТ на поверхность эрозии;
- Район перекрестно контролируется сейсмостанциями Норвегии и России;
- Имеется опыт международных трансграничных геологических исследований;
- Налажена давняя, эффективно действующая система совместного российско-финско-норвежского изучения и контроля комплексной приграничной экологической ситуации;
- Кольская сверхглубокая скважина – геологическая лаборатория. Это обстоятельство будет способствовать более достоверному изучению и мониторингу зоны размещения РАО и ОЯТ, равно как и тот факт, что Уральская сверхглубокая пройдена большей частью в породах, аналогичных породам на площадке ПО “Маяк”;
- Имеется международный опыт исследований по проблеме захоронения РАО - проекты 408 ЮНЕСКО и 261,262,793,794 МНТЦ (Минатома);

- Для большой территории и для разных пород будет изучена корреляция данных исследований в подземной лаборатории, на Кольской сверхглубокой, а также производственных геологоразведочных и горных работ;
- Разнообразный комплекс горно-геологических объектов позволит создать детальную объемную модель и осуществлять эффективный мониторинг геологической среды;
- Для пород изучены процессы взаимодействия с радиоактивными излучениями;
- Имеются локальные захоронения радионуклидов – готовые полигоны;
- Имеется опыт готовых базовых специализированных структур для подземной лаборатории (службы геомеханического мониторинга и ядерной геофизики комбината “Печенганикель”, созданные по инициативе ВНИИ (С-Петербург) и Горного института Кольского НЦ РАН более 30 лет назад);
- Близость территориально и по геологической обстановке к перспективной площадке Дальние Зеленцы;
- Несколько площадок в Печенгском районе рассматривались ранее и будут рассмотрены в дальнейшем;
- Близость к местам хранения РАО и ОЯТ Северного флота, ММП и Мурманского спецкомбината “Радон”, в т.ч. к возможным площадкам хранения реакторных отсеков АПЛ;
- Аналогичные формации – перспективные площадки Шапочка и Пояконда-Нигрозера, площадка ПО “Маяк”, площадка Красноярского ГХК и район Норильска (потенциально для РАО Красноярского ГХК);
- Аналогами пород Печенгской синклинали (и пород площадки ПО “Маяк”) являются также имеющие выгодное географическое положение преимущественно основные лавы Имандра-Варзугского синклинария и отдельных участков восточного побережья Кольского п-ва между населенными пунктами Сосновка и Городецкий Маяк;
- Самые крупные зарубежные проекты - Yucca Mountain, USA и Sellafield, UK, вулканогенно-осадочные породы. Наиболее реализованные (более 5) – в Швеции и Финляндии, гнейсы и граниты. Аналогичные формации слагают Печенгскую структуру и ее обрамление;
- Благоприятные социально-экономические условия;
- Ни одна из зарубежных подземных лабораторий, в т.ч. те, с помощью которых реализуются многонациональные проекты, не имеет такого комплекса благоприятных и уникальных условий;
- Запасной вариант для работы с общественностью.

Особый случай - изоляция РАО при утилизации АПЛ. Существующие программы утилизации АПЛ предусматривают наземное длительное (до 100 лет) хранение в специальных местах вырезанных реакторных отсеков без демонтажа внутреннего радиоактивного оборудования [11]. Геологическими задачами при этом являются определение подходящих площадок хранения сотен крупногабаритных радиоактивных "упаковок" и нахождение эффективных местных гидроизолирующих и сорбирующих радионуклиды природных материалов для создания дополнительных защитных инженерных барьеров. В настоящее время планируют за деньги Великобритании рассмотреть и реализовать пока безальтернативный для условий Кольского полуострова вариант размещения реакторных отсеков в Сайда-Губе ("Мурманский вестник" от 2.12.2000г.).

Однако, нельзя нагружать базы Северного флота и судоремонтные заводы (как и побережье единственного водного пути Мурманска – Кольского залива) несвойственной им функцией долговременного хранения больших объемов радиоактивных и просто отходов, операционная зона баз и заводов должна быть свободна от больших объемов потенциально опасных и не нужных для жизнедеятельности материалов (требование техники безопасности с учетом и обычных, и особых условий функционирования объектов). В декабре 2001г. в акватории Кольского залива произошло столкновение плавтехбазы «Имандра» (плавучего хранилища ОЯТ) с АПЛ отстоя. Есть реакторные отсеки с аварийным ОЯТ, которое не подлежит выгрузке. Они тоже будут в Сайда-Губе. Тогда резко возрастает опасность объекта. Кроме того, может возникнуть желание разместить здесь и другое ОЯТ, а также все РАО. Это не пустые фантазии. Уже сейчас более 50% реакторных отсеков Сайда-Губы дополнительно загружены РАО, т.е. использованы как контейнеры большой емкости. Если Челябинская область и Красноярский край в результате местных референдумов будут против размещения и переработки импортного ОЯТ на их территории, а Новороссийск, Санкт-Петербург, Находка и Дудинка (Диксон) откажутся быть перевалочной базой, то останется лишь вариант «отложенного хранения» такого топлива на Кольском полуострове. Такое хранение тем более вероятно, что за него США готовы платить России, лишь бы исключить или по крайней мере «заморозить» на 20 лет переработку импортного ОЯТ, одновременно сконцентрировав топливо в одном месте в целях нераспространения ядерных материалов («Атомная хроника России», 1, 2000г.). Приведем пример того, как реально могут обращаться с ОЯТ. Госатомнадзор РФ и Гражданский Центр ядерного нераспространения (Красноярск) в декабре 2001г. выразили тревогу по поводу крайне неудовлетворительного обеспечения безопасности при вывозе ОЯТ АПЛ Северного флота на

ПО «Маяк». Установлены факты загрузки в транспортно-упаковочные комплекты разрушенных тепловыделяющих сборок, утери части топлива, слабого контроля у поставщиков ОЯТ АПЛ готовности эшелонов к отправке (www.nuclearno.ru). Специалисты университета Умеа (Швеция) и Кольского научного центра совместно оценивают сценарии ядерного терроризма на объектах Северо-Запада. И что очень важно – на основе статистики реальных тревожных событий.

Под угрозой работа портов Мурманска. Снабжение Мурманска и Североморска и без того чрезвычайно уязвимо. Даже вследствие естественных природных процессов бывают перебои с поставками грузов по железной дороге и прекращается подача качественной питьевой воды. Сколько раз перекроют движение в Кольском заливе даже при штатной транспортировке в его акватории утилизируемых АПЛ и отдельно реакторных отсеков? И что же теперь, противопоставим АПЛ НАТО, которые контролируют горло Кольского залива, размещенные на выходе в Баренцево море отсеки списанных российских АПЛ? Создается помеха предстоящему скачку в развитии области, обусловленному резким усилением активности нефтегазовых компаний на шельфе Баренцева моря. Руководство этих компаний в стратегическом плане придает Мурманску особое значение. Как и Северному морскому пути. Например, "Лукойл" стал владельцем Мурманского морского пароходства и совладельцем Мурманского торгового порта, развивает танкерный флот арктического класса (в т.ч. для снятия порожденных «трубой» проблем), получил в управление атомные ледоколы и имущество РТП «Атомфлот». А «Роснефть» и «Газпром» вкладывают деньги в освоение шельфа уже в 2002г. Определенный позитивный вклад в оздоровление ситуации в акватории Кольского залива может внести многолетний проект American Association for the Advancement of Science по изучению загрязнения Баренцева и Белого морей через водосборы рек Кола, Тулома и озера Имандра, имеющий и прогнозную составляющую на основе интегрированных эколого-экономических моделей, вполне вероятным результатом оценок в рамках которой просматривается вывод о настоятельной необходимости "разгрузить" от РАО в долговременной перспективе наиболее промышленно-развитые и заселенные территории Кольского полуострова вдоль линии Канда拉克шский залив - Кольский залив.

Если отдельно твердые РАО Северо-Запада перебазировать в Красноярский край в принципе возможно, то реакторные отсеки АПЛ неизбежно будут размещены в регионе. Утилизация АПЛ, а тем более реакторных отсеков, не приносит экономической выгоды. Поэтому в реакторных отсеках на постоянной основе можно разместить и другие РАО. Мало у какой страны есть такие готовые и надежные контейнеры для захоронения больших объемов отходов.

С учетом этой цели, при дополнительных инвестициях зарубежных и российских производителей РАО, утилизация выведенных из эксплуатации АПЛ пойдет быстрее. Кроме того, Минатом отказался от перевозки ОЯТ атомных ледоколов и АПЛ на ПО “Маяк” и будет строить Федеральное наземное хранилище судового отработавшего топлива на Кольском полуострове (“Атомная хроника России”, №2, апрель-май 2000г.). При рассмотрении всех радиоактивных материалов “в связке” исчезает какой-либо смысл для региона транспортировать часть РАО за его пределы.

Для площадок хранения реакторных отсеков предпочтительны формации глин и глинистых сланцев, а также производных от них пород (аргиллиты, филлиты). Среди магматических более перспективны вязкие, пластичные породы ультраосновного и основного состава (диабазы, амфиболиты). Кристаллические породы кислого состава (гранитоиды) наименее желательны в качестве самостоятельной вмещающей среды (в т.ч. и породы площадки Сайда-Губа). Но они могут рассматриваться в сочетании с глинами и при создании мощных искусственных защитных барьеров.

Конкретные площадки Северо-Запада России дополнительно к официальной, безальтернативной на сегодня площадке Сайда-Губа нами оценены и сопоставлены с помощью геологических, экологических и экономических критериев. В частности, интерес могут представлять аргиллиты полуострова Средний-Рыбачий (например, западного побережья губы Эйны), невостребованные промышленностью залежи позднеледниковых и послеледниковых глин (Титовская, Какурийокская, Луостарская и др.), аргиллиты Южного острова Новой Земли [12]. Кроме того, специалисты Минатома предлагали хранить реакторные отсеки в районе п. Никель [13], где вскоре будет выведен из эксплуатации Ждановский карьер комбината “Печенганикель” (крупнейший в Европе) с огромными “запасами” доступного с поверхности бывшего подземного пространства и разветвит высокому инженерно-геологического качества базальты и диабазы, а также филлиты [14]. Кстати, при этом могла бы использоваться транспортная схема, аналогичная уже существующей, когда при размещении на хранение реакторных отсеков АПЛ США в Ханфорде (вулканогенно-осадочные формации) предусматривают перевозку отсеков на барже по системе “море-река” и по шоссе (42 км) на трейлере [15].

Как уже отмечалось, проект NUCRUS 95410 площадкам Печенги уделит мало внимания. Результаты комплексной оценки других площадок [16] отражают негативные проблемы. Даже перспективные площадки Дальние Зеленцы, Кузрека, Шапочка и Пояконда-Нигрозера будут либо оказывать значимое воздействие на особо охраняемые природные территории, либо серьезно разрушать среду обита-

ния отдельных биологических видов (в связи с общетехногенными процессами, сопровождающими строительство и эксплуатацию любого крупного промышленного объекта, т.к. выполненные оценки и предусмотренные технологии исключают вынос радиоактивности в биосферу и, соответственно, воздействие этого параметра на окружающую среду). Кроме того, аргументированно выбрать одну заведомо лучшую площадку из четырех практически равнозначных с помощью предложенной западными экспертами системы критериев оказалось невозможным. При такой неопределенности получение инвестиций для освоения какой-либо площадки затруднительно. В каждом из этих случаев не будет экономии на капитальных затратах из-за отсутствия какого-либо задела.

А совместные российско-финские исследования привели к настораживающим выводам. Стратегия «Печенганикеля» предполагает катастрофическое снижение численности рабочих, существующий путь развития компании ведет в тупик. Внутренний спрос на никель составляет ныне всего лишь 10% от того, что был в советский период. Среди работников «Печенганикеля» лишь около 20% удовлетворены действиями дирекции и более 70% считают, что нельзя работать по-старому. Более 80% населения социально-экономические проблемы Печенгского района выделяют в качестве главных [17].

Коллективное общественное сознание Печенгского района уникально. Оно может быть наиболее восприимчивым к идее подземного размещения РАО именно здесь. На фоне экономических и общих экологических неурядиц, как показали норвежские социологи, обеспокоенность населения района радиоэкологическими проблемами минимальна в сравнении с мнением людей по этому поводу в других местностях Кольского полуострова и сопредельных стран [18].

Печенга при низкой “потребительской стоимости” ее территории из-за условий арктической горной тундры и уже нанесенного ущерба природе со стороны подразделений комбината “Печенганикель” (не будет воздействия на экосистемы дополнительно к существующей ситуации), а также в связи с изложенными нами доводами по поводу ее благоприятных в широком смысле стартовых условий, может обеспечить объективную и мощную базу для выхода из замкнутого круга и принятия окончательного решения. Будут учтены не только методические рекомендации конкретной группы французских и бельгийских экспертов, но и общероссийские и региональные новые факторы и новые стимулы.

Таким образом, перспективы Печенги (Печенгского района) в проблеме изоляции РАО и ОЯТ достаточно прояснились. Площадки Печенги должны интенсивно рассматриваться далее в российских и зарубежных проектах как с научной, так и с практической точек зрения. Например, Представительство

Европейской Комиссии в России по согласованию с Минатомом приняло к рассмотрению заявку BIS/00/004-N от 13.02.2001г. на проект для программы TACIS “Изучение гидрогеологических аналогов площадок, выбранных для размещения радиоактивных отходов в России”. Уже в настоящее время работы на Кольской сверхглубокой скважине являют собой хороший пример такого подхода через аналогии к проблеме оценки риска размещения РАО в геологических формациях, причем “с запасом” по глубинам, изучаемым объемам и типам пород. В рамках проекта 408 ЮНЕСКО международным коллективом под руководством специалистов Германии (Геологический институт Боннского Университета, Н.-J. Kuempel and K. Schulze) на ней (глубина более 12 км) в сравнении со скважинами на прилегающей территории (глубины 2-3 км) и с немецкой сверхглубокой скважиной КТВ (глубина около 10 км) ведутся многочисленные непрерывные комплексные гидрогеологические эксперименты. Создаются локальные и обобщающие модели взаимодействия твердой и жидкой фаз геологической среды. Печенгская структура и ее обрамление – самый информативный российский аналог. Этот аналог не может игнорироваться (гидрогеологические условия подземных ядерных объектов Швеции и Финляндии в первом приближении уже сопоставлены с условиями Кольского полуострова [3-7,12]). В дальнейшем планируется распространить исследования и на другие сверхглубокие скважины бывшего Советского Союза (прежде всего на Уральскую, Тюменскую, Криворожскую). Не менее ценны и аналогии Норильска из-за близости их геологических условий одновременно особенностям площадок ПО “Маяк”, Новой Земли и Кольского полуострова. Целесообразна кооперация действующего и потенциального проектов.

Печенга соответствует важному принципу Минатома о приоритетности хорошо изученных площадок с безопасными геологическими формациями и благоприятными социально-экономическими условиями. Печенга полностью соответствует также критериям норвежской экологической организации «Беллуна» в части строительства временного хранилища ОЯТ на Кольском полуострове, которое «Беллуна» считает более приемлемой альтернативой хранилища ПО «Маяк» (Атомная Арктика, «Беллуна», 2001г.). В будущем нельзя исключать здесь и переход к объекту более высокого статуса, чем региональный. В Печенгу ОЯТ, например, Дальнего Востока можно транспортировать морем, не подвергая опасности загрязнения территорию России. Приграничное положение Печенги облегчает реализацию идеи Минатома о коммерческом приеме на хранение зарубежных РАО и ОЯТ. Например, в многофункциональных металлобетонных контейнерах, серийное производство которых начато в России, в т.ч. и (ЦТ, программа “Время” от 21.03.2001г., О.Е.Адамов) в соответствии с планами приема зару-

бежного ОЯТ. Идею импорта зарубежного ОЯТ в Россию в своё время инициировали и продолжают поддерживать США, но только для длительного хранения топлива (“Атомная хроника России”, №1, 2000г.). То есть эта позиция - хранение (возможно, и захоронение) в России зарубежного ОЯТ не имеет ныне внутри и вне страны серьёзных административных препятствий к реализации. За исключением, пожалуй, мнения Госатомнадзора. Но, например, 87,4% жителей Челябинска считают недопустимым ввоз на хранение на территорию Челябинской области зарубежного ОЯТ (“Атомная хроника России”, №3, 2000г.). Около 80-90 процентов россиян против импорта ОЯТ в страну (ЦТ, программа «Время» от 11.07.2001г.). «Зеленые» обещают в разных местах блокировать железную дорогу, но не допустить составы с зарубежным ОЯТ в Красноярск, а исламские террористы проявляют интерес к РАО в контексте радиологического оружия («Известия» от 24.10.2001г. и «Российская газета» от 5.12.2001г.). Что будет, если независимые действия совпадут по времени и месту? Совместное размещение отечественных (в т.ч. из-за пределов Северо-Запада, как вариант - высокоактивных и долгоживущих из Томска, Красноярска и Челябинска) и зарубежных РАО не в глубинных районах России, не вблизи южной границы страны и реальных или потенциальных очагов религиозного экстремизма, сепаратизма и локальных военных конфликтов (будет ли спокойным и неизменным положение этих районов через 10, 50 или 100 лет при динамичном изменении ситуации на азиатском постсоветском пространстве?), а в пограничной зоне относительно стабильной северной Европы в Мурманской области или Карелии – основа для компромисса между сторонниками и противниками импорта таких отходов (в стране уже было собрано необходимое количество подписей для проведения референдума с позиций “против”, а в Государственной Думе и президентом РФ идея импорта одобрена). По мнению депутатов Госдумы С. Иваненко и О. Морозова результат будущего референдума предreshен- «зеленые» победят («Литературная газета», 29, 2001г.). Тем не менее, Администрация президента подготовила законопроект о общественном контроле за импортом ОЯТ (ЦТ, программа «Зеркало» от 8.07.2001г.). Указ президента о таком контроле уже подписан (в состав комиссии входит П.А. Сажинов). Импортное ОЯТ можно оставлять у границы сразу же, «про запас». Мурманская областная Администрация поддерживает импорт РАО и ОЯТ в Россию (“Полярная правда” от 4.01.2001г.). А мурманское предприятие «Атомфлот» хотели бы видеть при этом перевалочной базой («Полярная правда» от 12.07.2001г.). В конце концов, его можно и перерабатывать на комбинатах Минатома, но импортные РАО от переработки лучше размещать «не совсем в России». Нельзя не учитывать предостережения достаточно

ответственных отечественных официальных экологов, которые, разделяя прогнозы Запада, предупреждают о возможных через 15-20 лет геополитических катаклизмах, порожденных дефицитом ресурсов (труды межрегиональной конференции северных регионов РФ “Север и экология – 21 век”, Сыктывкар, 2000г.). Перспективы Печенги (или Норильска) неразрывно связаны с предпосылками возможного объединения усилий разных отраслей, регионов России и даже стран. По сообщению норильских геологов, в условиях подземных рудников Норильска, где в полной мере реализуется концепция Минатома о природной мерзлотной гидроизоляции и имеются породы существенно лучшего, чем на Новой Земле, инженерно-геологического качества, беспокоит не вода, а пыль.

Норильск, кроме того, (еще раз подчеркнем) позволит реализовать и опыт Минатома по мерзлотной изоляции РАО и ОЯТ. Он, видимо, более перспективен в части приема РАО и ОЯТ не только Северо-Запада, Красноярска и Томска, но также Дальнего Востока и Челябинска. Минатом уже разрабатывает идею совместного захоронения именно в Красноярском крае отходов и топлива Красноярского горно-химического комбината, Сибирского химического комбината, ПО “Маяк” и других предприятий (проект 1491 Международного научно-технического центра). Тем более, что и Норильску по данным департамента металлургии Минпромнауки РФ жить «без проблем» относительно минерально-сырьевой базы не так долго – 30 лет.

По заказу “ядерных” регионов России, Минатома, флотов или экологических организаций возможно силами специалистов РАН и Министерства природных ресурсов подготовить детальное обоснование геологического потенциала Печенги в контексте общегосударственного могильника как основы для комплексных и при необходимости независимых экологической и технико-экономической экспертиз. Подготовить на уровне – не хуже, чем соответствующие материалы проекта NUCRUS 95410, который Официальный представитель Европейской Комиссии г-н Norbert Jousten назвал прекрасным примером и точкой отсчета для такого рода работ (протокол и решение совещания по программе TACIS от 15-16 марта 2000г.).

«Норильский никель» и РТП «Атомфлот» имеют общие интересы в сфере использования атомных ледоколов («Полярная правда» от 12.07.2001г.). Объединение готовой технологической структуры по обращению с РАО «Атомфлота» с площадкой под хранилище РАО и горной частью технологии «Норильского никеля» существенно усилило бы позиции этой «связки» относительно Севморпути. «Норильский никель» (Кольская горно-металлургическая компания) может кооперироваться в сфере изоляции РАО не только с военными и гражданскими поставщиками отходов из ядерного комплекса, но и со

своими кольскими коллегами по горной отрасли. Речь идет прежде всего о торийсодержащих отходах химической переработки лопарита на комбинате “Севредмет” (п. Ревда). Правда, “Севредмет” (с помощью институтов Минатома ВНИПИЭТ и ВНИИхимической технологии) может решить проблему отходов с опережением общей ситуации, самостоятельно и альтернативно (возможно, и с перспективой на сторонние РАО – вот и появятся требуемые деньги на развитие мощностей переработки лопарита), задействовав для этого собственные свободные подземные выработки или сопряженные с ними массивы пород высокого качества (“Панорама недели” от 22.07.2000г.). А потребность в жизненно важном для дальнейшего развития “Севредмета” надежном объекте изоляции своих отходов и приемлемые горно-геологические условия имеются [12]. Кроме того, нефелинсодержащие породы Ловозерского плутона, в т.ч. в виде отходов горно-обогательного производства, являются эффективной изолирующей средой для РАО и ОЯТ [19-21], например, в качестве буферной дополнительной засыпки контейнеров с отходами в подземных выработках [22]. Сибирским химическим (письма № 22/4511 от 22.07.96г. и № 22/7382 от 01.12.97г.) и Красноярским горно-химическим (письма №25-07-07/911 от 18.06.97г. и № 01-07-05/258 от 25.03.98г.) комбинатами Минатома, Администрацией Томской области (письма № 523 от 01.07.96г. и № 258 от 12.09.97г.), другими организациями рекомендовано продолжить исследования и провести опытно-промышленные испытания на СХК и ГХК, в т.ч. в рамках федеральной программы, по тематике использования этого и другого минерального сырья для изоляции радиационно опасных объектов. Эти испытания имели бы вполне конкретные цели применительно к комбинатам, а также планировались как опережающие относительно задач регионального (общегосударственного) могильника РАО на Кольском полуострове. В настоящее время в измененном виде, но идею специалисты Минатома уже разрабатывают самостоятельно [23].

Поэтому совместно комбинаты “Печенганикель” и “Севредмет” тем более способны обеспечить все горнотехнологические функции при изоляции всех категорий радиоактивных отходов, особенно если наиболее опасная их часть будет перебазирована в Красноярский край. Из числа сторонних в Ревде, возможно, целесообразно накапливать “удобные” отходы АЭС (большинство АЭС страны сосредоточено в европейской части), создав здесь филиал цеха по обращению с РАО КАЭС. Печенга концентрировала бы невывозимые за пределы Северо-Запада ОЯТ и РАО атомных флотов. При решении комбинатами столь важной для региона задачи уместен вопрос о налоговых льготах для этих предприятий в соответствии с разработанными в Мурманской области экономическими методами управления экологической безопасностью. Возможно, прием сторонних РАО

может быть и самостоятельным, без переработки лопарита, вариантом сглаживания негативных последствий банкротства "Севредмета". Тем более, что, видимо, вскоре Минатом станет совладельцем "Севредмета" и прорабатывает разные варианты сотрудничества с ним. По «Севредмету» работает экспертная группа Минатома (Мурманское телевидение от 29 и 31.05.2001г., «Полярная правда» от 4.07.2001г.). Естественно радиоактивные лопаритовые породы отвечают озвученным в 2000г. президентом В.В.Путиным новейшим ядерным инициативам Минатома, предусматривающим предпочтительное захоронение РАО в рекультивированные горные выработки природных радиоактивных формаций [24]. Подземная лаборатория в Ревде, опережающая строительство хранилища на Кольском полуострове, была бы компромиссом между Печенгой и Хибинами. Щелочные породы Ловозерского плутона по положительным в контексте сорбции радионуклидов процессам взаимодействия вода-порода ближе благоприятным породам ПО «Маяк», Печенги и Хибин, чем гранитоиды.

Печенгская и Норильская структуры, Ловозерский массив изучены на глубину не менее 1 км с помощью

горных выработок и сотен скважин. Для сравнения – на всех радиохимических комбинатах Минатома готовые мощности для подземного захоронения твердых РАО отсутствуют, подходящих скальных массивов в районе Томска нет, а положительные результаты исследований несколькими скважинами соответствующих площадок на территории ПО «Маяк» и Нижнеканского массива широкой общественности достаточно надежно не известны.

Минатом, похоже, уже начал консультации с «Норильским никелем» по поводу Печенги («Версия» от 2-8.10.2001г.). Организации и специалисты Минатома по материалам Кольской сверхглубокой скважины в рамках международных проектов 261, 262, 793 и 794 МНТЦ (www.istc.ru) оценивают те или иные аспекты безопасности. Проект 1446 МНТЦ применительно к концепции мерзлотной изоляции показывает, с другой стороны, усиление интереса Минатома к восточным районам страны. И это согласуется с тенденцией таблицы 2, которая подобно движению по спирали на новом уровне сохраняет лучшее из наработанного и одновременно отображает поиски, вызванные уязвимостью конкретной площадки Новой Земли.

Таблица 2. Изменение позиции Минатома относительно долговременного размещения твердых РАО Севера-Запада РФ

Годы	Место	Вид РАО	Прим-е
85-90	Кольский п-в (одно место, не опред.)	Все категории РАО+неперер. ОЯТ+ реакт. отсеки	Факт
91-94	Новая Земля (Губа Башмачная)	Аналогично 85-90гг	Факт
98-01	Губа Башмачная или Кольский п-в Красноярский кр. (Нижнекан. массив) Кольский п-в (Сайда-Губа)	Низкоактивные и среднеактивные РАО Высокоактивные РАО и ОЯТ Реакторные отсеки АПЛ	Факт Факт Факт
02	Кольский п-в (Дальние Зеленцы) Кольский п-в (Сайда-Губа)	Все категории+ ОЯТ Реакторные отсеки	Прогноз Факт
03-04	Печенга (Ревда, Оленегорск) или Норильск	Все категории+ОЯТ	Прогноз

Члены Ассоциации «Северо-Запад» настаивают на скором принятии Правительством РФ решения о размещении и создании регионального долговременного хранилища (могильника) РАО и ОЯТ в северном регионе России («Мурманский вестник» от 2.06.2000). На завершающей стадии находится подготовка Соглашения о безвозмездной международной финансовой помощи Мурманской области в сфере ядерной и радиационной безопасности (Совет Баренцева Евро-Арктического Региона, Мурманск, 15-16 марта 2001г.). В отчете РАН за 2000г., разработанная Горным институтом Кольского НЦ модель радиогеоэкологического обеспечения безопасного подземного захоронения РАО в скальных породах Кольского полуострова названа в числе главных достижений Академии. Эта же работа, совместно с исследованиями ИГЕМ, отмечена среди лучших за пять лет в отчетном докладе Президиума РАН в ноябре 2001г. Региональные Администрации и структуры РАН работают совместно, как это предусмотрено, например, Соглашением между Администрацией Мурманской области, Кольским научным центром, Северным флотом и государст-

венными предприятиями по координации взаимодействия в сфере ядерной и радиационной безопасности на территории Мурманской области от 7 марта 2000г. Лучше, если выбор места изоляции РАО и ОЯТ будет выполнен с учетом этих обстоятельств и посредством конкурса, как это было запланировано Мурманским областным комитетом охраны природы еще в 1991г. На основе высочайших нравственности и ответственности, как призывает подходить к решению глобальных экологических проблем Русская Православная Церковь («Сибирская православная газета», № 1, 2000г., «Основы социальной концепции Русской Православной Церкви» от 16.08.2000г.). При широком освещении проблемы в средствах массовой информации. Первые примеры – публикации в газетах «Кольский Север» (Мурманск) от 25.10, 3.11, 10.11.2000г., «Кольское слово» (Кола) от 21.03.2001г. и 16.01.2002г., «Рыбак Камчатки» (Петропавловск-Камчатский) от 17.05, 14.06.2001г., «Вечерний Мурманск» (Мурманск) от 26.10.2001г., в канадской газете "The young street review" (190, 2002г.), на сайтах Трифонов Печенгского монастыря от 17.09.2001г. и

Гражданского Центра ядерного нераспространения (Красноярск) от 30.12.2001г., 9.03.2002г. и 5.09.2002г., а также в журнале "Север" (Петрозаводск), № 9, 2000г и № 4-6, 2002г. . Возможно, некоторые разрабатываемые положения будут полезны и при решении проблем изоляции от биосферы нерадиоактивных вредных химических и бактериологических веществ общепромышленного и военного происхождения. Особенно, как уже отмечалось, в

условиях осложняющейся ситуации в мире и фактической незащищенности от трагедий всех стран (сентябрь 2001г., октябрь 2002г.). Когда в США и России спешно ищут достойные ответы новым вызовам времени, подрывающим веру в безопасность наземных ядерных объектов ("Известия" от 27.09.2001г. и «Энергетика и промышленность России», ноябрь 2001г, www.nuclearno.ru).

ЛИТЕРАТУРА

1. Комлева Е.В. Ядерная сфера-информационная поддержка решений// Уральский геологический журнал.-1(25),2002.- С.163-170..
2. Bradley D.J. Behind the Nuclear Curtain: Radioactive Waste Management in the Former Soviet Union. Battelle Press, 1997, Columbus-Richland, 716 p.p.
3. Комлев В.Н., Бичук Н.И., Зайцев В.Г., Мелихова Г.С. О перспективности площадок северо-западной части Мурманской области для размещения радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива // Тез. Докл. Конф. "Радиационная безопасность: радиоактивные отходы и экология". – С-Петербург, 1999. – С.24-25 и Геологические исследования и охрана недр. Научн.-техн. инф. сб. – ЗАО "Геоинформмарк".- М., 2000.-Вып 2.-С.29-33.
4. Комлев В.Н., Бичук Н.И., Зайцев В.Г., Мелихова Г.С. К решению проблем захоронения радиоактивных отходов в северо-западной части Мурманской области // Цветная металлургия.-№ 1, 2000. – С.36-38.
5. Комлев В.Н., Бичук, Зайцев В.Г. и др. Никеленосные провинции и перспективные для размещения радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива территории// Минерал.-1999, № 2.- С. 52-55.
6. Комлев В.Н., Бичук Н.И., Зайцев В.Г. и др. Север России: проблема радиоактивных отходов и экономические тенденции// – 2001. – в печати.
7. Комлев В.Н., Бичук Н.И., Зайцев В.Г. и др. Социально-экономические предпосылки нетрадиционного участия сырьевых отраслей в ядерных программах//. Ресурсы регионов России.- 2000, № 3.- С. 2-10 и Вестник Удмуртского университета. Проблемы теории и практики экономической науки. - 2000, №9. - С. 169-194.
8. Комлев В.Н. Радиоэкологические модели Минатома и Швеции-наилучшая интеграция с Печенгой или Норильском//Тез. Докл. Конф. «Проблемы радиоэкологии морей Европейской части России».-Ростов-на-Дону,2001.-С.35-36.
9. Комлев В.Н., Конухин В.П. Радионуклиды и минералы – сосуществование в природных и техногенных условиях. – Апатиты, 1992. – 146с.
10. Come B., Heitz J., Matray J. и др. Повышение надежности обращения с радиоактивными отходами в северо-западном регионе России. Размещение радиоактивных отходов – этап 2. Проект TACIS NUCRUS 95410. Задача 5: Определение необходимых полевых испытаний. – Отчет, 1998. – 87с.
11. Саркисов А.А. Экологические аспекты утилизации атомных подводных лодок // Изв. АН,сер. "Энергетика",1999№1, С. 47-60.
12. Комлев В.Н. Ответственность поколений и выбор мест подземного размещения потенциально суперопасных объектов: некоторые аспекты// Живая Арктика, 1999, №1 (11), С. 34-44.
13. Нилсен Т., Кудрик И., Никитин А. Северный флот. Потенциальный риск радиоактивного загрязнения региона// Доклад объединения "Беллуна". – Осло, 1996, 168с.
14. Комлев В.Н., Бичук Н.И., Зайцев В.Г., Мелихова Г.С. О перспективности площадок северо-западной части Мурманской области для размещения радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива// Ресурсы регионов России, 2000, №2, С.54-57.
15. Вывод из эксплуатации атомных подводных лодок США// Атомная техника за рубежом, 1994, №10, с. 13-17 и №11, с. 12-17.
16. Melnikov N.N., Konukhin V.P., Komlev V.N. et al.Improvement of the Safety of Radioactive Waste Management in the North – West of Russia. Disposal of Radioactive Waste. Phase 2. Project TACIS NUCRUS 95410. Task 7: Evaluation of suitable sites.- Report, 2000. – 155 p.p.
17. Андреев О. , Раутио В., Туккулайнен М., Изменения в горнодобывающей промышленности Печенгского района Мурманской области-социальные аспекты// Наука и бизнес на Мурмане.-2000, 2.-С.5-11.
18. Хансен Э., Теннессен А. Окружающая среда и условия жизни на Кольском полуострове//Фафо-институт прикладной социальной науки.-Мурманск,2000,196с.
19. Комлев В.Н., Конухин В.П., Руссков В.П. Способ создания средства для очистки воды от радиоактивных загрязнений. А.С.СССР № 1829718. Заявка 4914969/25 от 27.02.91.
20. Комлев В.Н., Конухин В.П. Средство для изоляции аварийного ядерного топлива. А.С. СССР № 1795805. Заявка 4914923/25 от 27.02.91.
21. Комлев В.Н., Конухин В.П. Средство изоляции радиоактивных веществ. А.С. СССР № 1829719. Заявка 4934729/25 от 08.05.91.
22. Komlev V.N. Use of Natural Materials from Northern Russia for the Isolation of Radioactive Wastes and Spent Nuclear Fuel//NATO ASI Series, Defence Nuclear Waste Disposal in Russia: International Perspective, 1998, 85-98.

23. Филиппов Е.А., Середенко В.А., Волоснев А.В. и др. Разработка процесса отверждения U-Pu-содержащих пульп и растворов с использованием производных кремнийорганических соединений//Известия Академии Промышленной Экологии.-1999.-2.-С.50-56.
24. Работнов Н.С., Ганев И.Х., Лопаткин А.В. Ядерная инициатива президента России (попытка анализа и детализации), Атомная энергия, 2001г., т.90, вып. 4, с. 320-323.

**РАДИОАКТИВТІ ҚАЛДЫҚТАРДЫ ШЕКТЕУ ПРОБЛЕМАСЫНДАҒЫ
ИНТЕГРАЦИЯНЫҢ ТЕНДЕНЦИЯСЫ ЖӘНЕ РОССИЯ СӨЛТҮСТІГІНІҢ ПОТЕНЦИАЛЫ**

¹⁾В.Н. Комлев, ²⁾Н.И. Бичук, ²⁾В.Г. Зайцев, ³⁾Г.С. Мелихова, ⁴⁾В.А. Павлов

¹⁾*РФА Кольск ҰО,*

²⁾*Мурманск облысының табиғи ресурстар комитеты,*

³⁾*Мурманск геологиялық зерттеу экспедициясы,*

⁴⁾*Орталық-Кольск геологиялық зерттеу экспедициясы*

Радиоактивті қалдықтарды Ресейде орналастыру мәселесін зерттеп байқау бұл түйінді мәселенің бүткіл күрделілігін көрсетті. Келешекте көмуге жарайтын орындар ішінде бейіт үшін ең тиянақты алаң ретінде жан-жақты жағдайлар бойынша Печенга немесе Норильск ауданы ұсынылады.

**TENDENCY OF INTEGRATION AND POTENTIAL OF THE NORTH
OF RUSSIA IN THE PROBLEM OF RADIOACTIVE WASTE ISOLATION**

¹⁾V.N. Komlev, ²⁾N.I. Bichuk, ²⁾V.G. Zaitzev, ³⁾G.S. Melikhova, ⁴⁾V.A. Pavlov

¹⁾*Kolsky NC RAS,*

²⁾*Natural Resources Committee of Murmansk region,*

³⁾*Murmansk geological prospecting expedition,*

⁴⁾*Central Kolsky geological prospecting expedition*

Research on the issues of radioactive waste disposal in Russia has revealed all complexity of this problem. From among prospective disposal sites the Pechenga or Norilsk area seems to be the most justified burial ground for radioactive wastes as it complies with the whole complex of specific requirements.

УДК539.21:620.1:621.039.516

ПОСЛЕРЕАКТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЭЛОВ, ОБЛУЧЕННЫХ
В АЗОТООХЛАЖДАЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КАНАЛАХ КЭТ¹Дерявко И.И., ¹Колодешников А.А., ²Перепелкин И.Г., ¹Пивоваров О.С., ¹Стороженко А.Н.¹Институт атомной энергии ИЯЦ РК²Национальный ядерный центр РК

Исследовано состояние стержневых керамических твэлов после длительных (около 10 часов) испытаний в проточных азотоохлаждаемых технологических каналах КЭТ реактора ИВГ.1. Установлена достаточно высокая радиационно-химическая стойкость твэлов в конкретных условиях реакторных испытаний.

ВВЕДЕНИЕ

Известно [1-3], что безоболочковые стержневые карбидные ((U,Zr,Nb)C) и карбидографитовые ((U,Zr)C+C) твэлы с высоким (на уровне 30 % (масс.) и выше) содержанием урана обладают при повышенных (≥ 1000 K) температурах низкой химической и радиационно-химической стойкостью в азоте высокого (~ 20 МПа) давления даже в условиях статического состояния газа. Известно также, что степень нитрирования твэлов (вызывающего разупрочнение топливных стержней) существенным образом зависит от конкретных условий испытаний: температуры и длительности испытаний, давления и чистоты азота, наличия или отсутствия протока газа. Кроме того, степень нитрирования зависит при прочих равных условиях и от исходного состава и структуры материала твэлов.

В связи с отмеченным представляет определенный интерес экспериментальное установление качественных и количественных показателей радиационно-химической стойкости карбидных и карбидографитовых твэлов со сниженным до ~ 16 % (масс.) содержанием урана в азоте невысокого (~ 1 МПа) давления в случае облучения при температуре порядка 1000 K в условиях протока газа через тепловыделяющие сборки технологических каналов КЭТ реактора ИВГ. 1.

В реакторных испытаниях участвовали твэлы четырех проточных азотоохлаждаемых каналов КЭТ, тепловыделяющие сборки которых содержали по шесть нагревных секций со 151 топливным стержнем в каждой НС. При этом расход азота через отдельную ТВС поддерживался на уровне 0,1 кг/с; максимальная температура $T_{\text{обл}}$ у твэлов во входных НС находилась на уровне 600 K, а в выходных – не превышала 1600 K; давление азота на входе и выходе ТВС составляло соответственно $\sim 1,2$ и $\sim 0,5$ МПа; длительность испытаний твэлов составила ~ 3 часа в первом канале (канал КЭТ №1 участвовал только в одном реакторном пуске), $\sim 6,5$ часов во втором (канал КЭТ №2 участвовал в четырех пусках) и $\sim 9,5$ часов в третьем и четвертом (каналы КЭТ №3 и №4 участвовали в пяти пусках).

Следует отметить также, что в испытаниях использовался относительно сухой и чистый азот: со-

держание примесей кислорода в прокачиваемом через ТВС азоте находилось на уровне $5 \cdot 10^{-3}$ % (об.), а температура точки росы не превышала минус 60°C.

Послереакторные исследования твэлов включали оценку общего состояния топливных стержней в НС разделяемых каналов, измерение глубины нитрирования твэлов (толщины возникающего диффузионного карбонитридного слоя), а также определение величин и знаков изменений таких характеристик твэлов, как масса M , длина L , диаметр D , средне-массовый период решетки $\bar{a}_0$, погонное электросопротивление R , статический модуль упругости E и прочность σ_b . Для исследований были использованы только твэлы, испытанные в четырех или пяти реакторных пусках, т.е. твэлы трех азотоохлаждаемых каналов КЭТ №2, №3 и №4.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При оценке общего состояния твэлов в процессе разделки каналов были получены вполне удовлетворительные результаты. Во всех НС всех каналов поломки твэлов отсутствовали. Осевые продольные закрутки пучков твэлов в НС были незначительными: до $\sim 2-5^\circ$ в низкотемпературных секциях №1 и №2 и до $\sim 5-10^\circ$ в высокотемпературных, причем закрутки на углы до $\sim 10^\circ$ были зафиксированы только в НС №5 и №6 канала КЭТ №4. Искривления (пластические деформации) у твэлов не обнаруживались ни визуально (Рис. 1), ни при инструментальном измерении кривизны стержней.

Цвет поверхности твэлов изменился во всех НС всех каналов. В первых трех-четырех НС отмечалось в основном потемнение твэлов, но при этом у твэлов НС №1 всех трех каналов кроме темно-серых присутствовали также слабые желтые и фиолетовые оттенки. У твэлов высокотемпературных НС преобладали темно-серые и черные оттенки, более ярко выраженные в центре НС по сравнению с ее периферией; присутствовали также и слабые золотисто-желтые, фиолетовые и малиновые оттенки. Следует иметь в виду, что темно-серые, черные и золотисто-желтые цвета характерны для карбонитридов различного состава, фиолетовые и малиновые – для оксикарбидов или оксикарбонитридов.

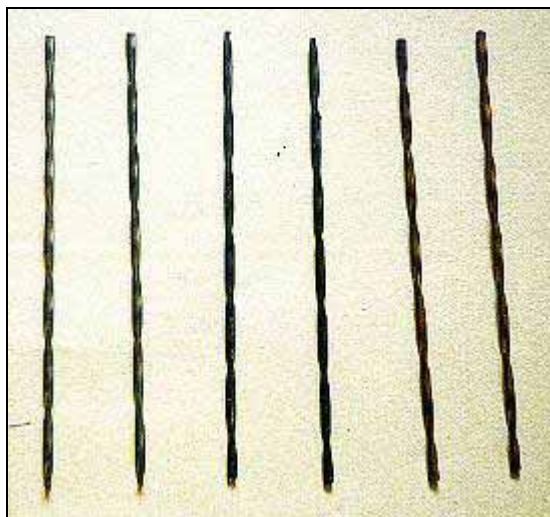


Рисунок 1. Внешний вид твэлов после ~9,5-часовых испытаний в канале КЭТ №4, отобранные из различных НС по высоте ТВС канала: слева направо – НС №1, ..., №6

Изменение морфологии поверхности твэлов (появление шероховатости на первоначально гладкой поверхности) визуальное было зафиксировано у твэлов НС №4, ..., №6 всех каналов. При этом у твэлов, испытанных в 5 пусках, шероховатость была несколько более заметной, чем у твэлов, испытанных в 4 пусках; степень шероховатости у твэлов всех каналов увеличивалась в направлении от НС №4 к НС №6, а также в направлении от периферии каждой НС к ее центру. Поверхностный слой у твэлов с повышенной шероховатостью внешне выглядел как плотный и прочный.

Во всех трех каналах в нагревных секциях №6 (а в канале КЭТ №4 и в НС №5) были обнаружены отдельные группы слабо припеченных друг к другу твэлов. В каждой секции могло быть до трех таких групп твэлов с боковым припеканием. На стыке НС №5 и №6 канала КЭТ №4 было обнаружено также и слабое торцовое припекание твэлов.

Поверхностные трещины у твэлов всех НС всех каналов отсутствовали. Последнее было установлено путем сопоставления для каждого исследуемого твэла результатов измерений его погонного электросопротивления R и стрелы прогиба f (при нагружении фиксированным усилием). Кроме того, факт отсутствия поверхностных трещин был впоследствии подтвержден при выполнении прочностных испытаний твэлов: на гистограммах распределения значений прочности $(\sigma_b)_i$ не было замечено явно выраженных вторых пиков (или сильных размытий) в области низких значений прочности.

Для установления характера изменения по высоте ТВС основных параметров облученных твэлов были использованы твэлы, отобранные из центральных зон каждой НС каждого канала, причем из каждой НС отбиралось не менее 25 твэлов. Измерениями масс M_i , диаметров D_i , длин L_i , и периодов $(\bar{a}_0)_i$ модулей E_i и электросопротивлений R_i у всех отобранных твэ-

лов, было получено убедительное подтверждение факта взаимодействия материала поверхности твэлов с азотом и кислородосодержащими примесями (O_2 , H_2O , CO , CO_2) в условиях испытаний в проточных азотоохлаждаемых каналах КЭТ.

Так, значения масс, диаметров и модулей упругости твэлов имели устойчивую тенденцию к повышению с увеличением температуры $T_{обл}$ по высоте ТВС каналов, в то время как значения их длин, периодов решетки и электросопротивлений по высоте ТВС имели устойчивую тенденцию к снижению. Подобные тенденции (они показаны на рисунке 2 на примере утолщений и удлинений топливных стержней) указывают на то, взаимодействие азота (и примесей кислорода) с материалом твэлов имело место только в сравнительно тонких поверхностных слоях стержней. Действительно, из анализа поперечных изломов и поперечных шлифов твэлов следовало, что толщина периферийного слоя, отличающегося от внутренних областей стержня по цвету, характеру разрушения, микроструктуре и ее травимости, у твэлов высокотемпературных НС после ~9,5-часовых испытаний составляет около 50 мкм, а у твэлов входных НС – примерно в пять раз меньше.

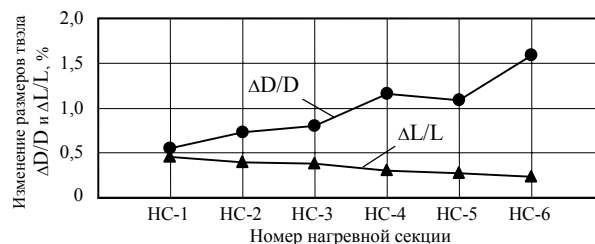


Рисунок 2. Сопоставление утолщений $\Delta D/D$ и удлинений $\Delta L/L$ твэлов по высоте ТВС каналов КЭТ, прошедших ~9,5-часовые испытания в реакторе ИВГ.1

Результаты определения изменений наиболее важного из исследуемых параметров твэлов, т.е. их прочности, представленные на рисунке 3, также указали на небольшую глубину нитрирования топливных стержней: разупрочнение твэлов в высокотемпературных секциях достигло только около 20 %.

В полученных результатах (Рис. 3) обращает на себя внимание, во-первых, то, что прочность твэлов в первых трех НС выше исходной на 10-30 %. Упрочнение твэлов связано с возникновением на их поверхностях сжимающих остаточных радиационных макронапряжения $\sigma_{ост}$ [4-6]. Невысокий уровень упрочнения твэлов обусловлен как невысоким уровнем напряжений $\sigma_{ост}$, так и негативным влиянием процессов оксинитрирования их поверхностей в потоке загрязненного кислородом азота. Во-вторых, то, что разупрочняющее влияние процессов оксинитрирования твэлов проявляется при всех температурах в области 600...1600 К: прочность твэлов после ~9,5-часовых испытаний во всех НС ниже, чем после испытаний длительностью ~6,5 часов.

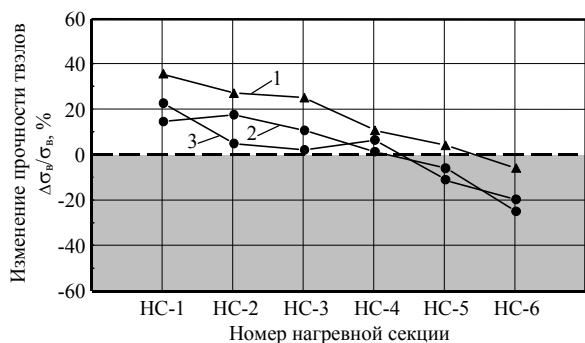


Рисунок 3. Изменения прочности твэлов по высоте ТВС трех каналов КЭТ: 1 – КЭТ №2 ($\tau = 6,45$ ч); 2 и 3 – КЭТ №3 и №4 ($\tau = 9,38$ ч).

В заключение следует обратить внимание на то, что обнаруженное в каналах КЭТ припекание соседних твэлов друг к другу является, по-видимому, характерным для испытаний твэлов в газовой смеси азота и кислорода (испытания в условиях протока газа, содержащего примеси кислорода, сами по себе равносильны повышению содержания кислорода в прокачиваемом объеме ТВС, причем это повышение пропорционально расходу газа через ТВС).

Явление припекания твэлов может быть связано с тем, что в процессе оксинитрирования материала их поверхностного слоя образуется диффузионная

зона, содержащая не только диффузионный слой насыщения (как в случае нитрирования в условиях особо чистого азота), но и диффузионное покрытие [7]. Тогда в момент образования и роста покрытий (у каждого из соседних твэлов) вполне возможно диффузионное сращивание этих покрытий на участках их механического контакта.

Из сказанного вытекает, что в случае выполнения испытаний в азоте более высокой частоты явления припеканий твэлов друг к другу в каналах КЭТ должны отсутствовать. Кроме того, должны происходить и меньшие, чем показано на рисунке 2, увеличения диаметров твэлов.

В целом же полученные после испытаний карбидных и карбидографитовых твэлов в проточных азотоохлаждаемых каналах КЭТ реактора ИВГ.1 основные положительные результаты – небольшая глубина нитрирования и полное сохранение целостности твэлов, упрочнение топливных стержней в низкотемпературных НС и невысокий уровень их разупрочнения в высокотемпературных НС – свидетельствовали о достаточно высокой радиационно-химической стойкости исследованных твэлов в конкретных условиях реакторных испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дерявко И.И., Перепелкин И.Г., Пивоваров О.С., Стороженко А.Н. Экспериментальное изучение процессов нитрирования карбидографитовых твэлов в азоте высокого давления. - Сб. "Вестник НЯЦ РК", вып. 4, Курчатов, НЯЦ РК, 2000, с. 129-135.
2. Дерявко И.И., Зеленский Д.И., Перепелкин И.Г. и др. Радиационная и радиационно-химическая стойкость карбидных твэлов в гелии и в азоте. – Материалы II межд. конф. "Ядерная и радиационная физика", т. 1, Алматы, Казахстан, 1999, с. 34-43.
3. Дерявко И.И., Перепелкин И.Г., Пивоваров О.С., Стороженко А.Н. Исследование радиационно-химической стойкости карбидографитовых твэлов в азоте высокого давления. - Сб. "Вестник НЯЦ РК", вып. 1, Курчатов, НЯЦ РК, 2001, с. 87-96.
4. Власов К.П., Меденцев В.П., Мозуль И.И. и др. Поведение под облучением материалов на отнове тугоплавких карбидов. – ВАНТ. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение, 1983, вып. 4(27), с. 42-46.
5. Дерявко И.И., Тарасов В.И. Исследование изменения прочности твэлов после реакторных испытаний применительно к работе ЯЭДУ на двигательном и энергетическом режимах. – Докл. III отрасл. конф. "Ядерная энергетика в космосе. Ядерные ракетные двигатели. Семипалатинск-21, 1992 г.", ч. 3, Подольск, НИИ НПО "Луч", 1993, с. 791-799.
6. Дерявко И.И., Егоров В.С., Ланин А.Г. и др. Рентгенографическое исследование остаточных макронапряжений в стержневых безоболочковых карбидных твэлах. – Сб. "Вестник НЯЦ РК", вып. 4, Курчатов, НЯЦ РК, 2001, с. 99-104.
7. Бабад-Захряпин А.А. Дефекты покрытий. – М., Энергоатомиздат, 1987. - 152 с.

АЗОТПЕН СУЙЫТЫН ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ КЭТ АРНАЛАРЫНДА СӘУЛЕЛЕНГЕН ТВЭЛДЕРДІҢ РЕАКТОРДАН КЕЙІНГІ ЗЕРТТЕУІ

¹И.И. Дерявко, ¹А.А. Колодешников, ²И.Г. Перепелкин, ¹О.С. Пивоваров, ¹А.Н. Стороженко

¹ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты

²ҚР Ұлттық ядролық орталығы

ИВГ.1. ағынды азотпен суыйтын технологиялық КЭТ арналарындағы ұзақ (10 сағатқа жуық) зерттеулерден кейін керамикалық өзекті твэлдердің жағдайы зерттелді. Реакторлық зерттеулердің нақты жағдайларындағы твэлдердің жеткілікті жоғары радиациялық -химиялық төзімділігі анықталды.

**POST-REACTOR RESEARCH OF FUEL PINS, RADIATED
IN NITROGEN-COOLING TECHNOLOGICAL CHANNELS ETC**

¹I.I. Deryavko, ¹A.A. Kolodeshnikov, ²I.G. Perepelkin, ¹O.S. Pivovarov, ¹A.N. Storozhenko

¹*Institute of Atomic Energy NNC RK*

²*National Nuclear Center RK*

The state of ceramics fuel pins after long-term (about 10 hours) tests in flowing nitrogen-cooling technological channels ETC of IVG.1 reactor was researched. Rather high radiation-chemical stability of the fuel pins under definite conditions of reactor tests was determined.

УДК 539.21:539.12.04

**СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В МЕТАЛЛАХ
С ОЦК-СТРУКТУРОЙ ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ**

Абылкалыкова Р.Б., Скаков М.К.

Восточно-Казахстанский государственный университет, г. Усть-Каменогорск

В работе показано, что имплантация ОЦК-вольфрама и тантала ионами азота или кислорода приводит к образованию плотноупакованных ГЦК-структур. В случае азота возникающие структуры представляют собой хорошо известные нитриды вольфрама W_2N и тантала TaN , в то время как в случае кислорода появляющиеся фазы можно идентифицировать как оксиды вольфрама W_2O и тантала TaO .

Ранее было показано [1], что характер структурно-фазовых превращений в молибдене определяется, в основном, соотношением атомных радиусов элементов внедрения и матрицы (η). Если оно не превышает определенного значения (для молибдена $\eta < 0,69$), что коррелирует с известным правилом Хэгга ($\eta < 0,59$) [2], то при внедрении возникают лишь соединения с простыми структурами (преимущественно плотноупакованными ГЦК- или ГПУ-структурами). В противном случае имплантация ведет к разупорядочиванию решетки исходной матрицы и для синтеза соответствующих соединений необходим дополнительный отжиг при температурах, превышающих определенные пороговые значения. В последнем случае образуются равновесные структуры, обладающие различным типом кристаллических решеток.

В настоящей работе представлены экспериментальные данные по структурно-фазовым превращениям, полученные на вольфраме и тантале при имплантации их ионами азота или кислорода, для которых η составляет 0,50, 0,43, 0,48 и 0,41 соответственно [3].

В качестве исходного материала использованы монокристаллические образцы вольфрама и тантала чистотой 99,96%, вырезанные в виде прямоугольников размерами $8 \times 1,5 \times 1 \text{ мм}^3$. После механической обработки образцы подвергались электрохимической полировке с целью удаления деформированных слоев. Внедрение ионов азота и кислорода с энергиями 70 и 80 кэВ, соответственно, дозами $1,87 \times 10^{17}$ (Φ_1), $3,74 \times 10^{17}$ (Φ_2), $5,6 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (Φ_3) проводилось в вакууме ($1,3 \times 10^{-3} \text{ Па}$) при плотностях тока, не превышающих $1 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$. Значения энергий ионов выбирались таким образом, чтобы обеспечить примерно одинаковые расчетные профили их распределения [4] без учета эффектов распыления. Термический отжиг образцов осуществлялся в вакууме ($6,6 \times 10^{-3} \text{ Па}$) через 100°C в диапазоне температур $400\text{--}1000^\circ\text{C}$ в течение 1 часа каждый. Идентификация структуры приповерхностных слоев проводилась по рентгенограммам, полученным с использованием узкого пучка монохроматизирован-

ного CuK_α излучения, направленного под скользящим (6°) углом к поверхности образца [5]. При образовании текстурированных фаз для уточнения результатов проводились дополнительные съемки при углах падения 6, 9 и 15° . Время экспозиции при каждой съемке составляло от 15 до 30 часов.

После внедрения ионов азота в вольфрам на рентгенограммах появляется набор рефлексов от текстурированной со следами поликристалла фазы, которая представляет собой нитрид вольфрама W_2N с плотноупакованной ГЦК-структурой. На рис.1 представлены рентгенограммы, которые показывают вид возникающих отражений при различных углах съемки. Их расплывчатость свидетельствует о степени разупорядоченности возникающей фазы. В текстурированном состоянии она возникает уже при дозе Φ_1 и при увеличении дозы имплантации до Φ_3 переходит в поликристаллическое состояние.

Необходимо отметить, что после ионной имплантации на разных образцах вольфрама получались, на первый взгляд, неоднозначные результаты. Дело в том, что исследуемые образцы вырезались сначала в виде дисков, которые затем разрезали на прямоугольники в произвольных направлениях. В случае образования фаз в поликристаллическом состоянии это не имеет существенного значения. Однако при образовании текстурированных фаз даже при использовании всего набора используемых углов падения рентгеновского пучка на образец рефлексы от них далеко не всегда могут попасть на регистрирующую пленку. При этом может сложиться ложное представление об отсутствии процесса образования фаз. В данной работе использовались образцы, разрезанные как в «ориентированных» направлениях, когда удавалось зарегистрировать возникающие рефлексы, так и в «неориентированных», где рефлексы не появлялись. При образовании наряду с текстурированной фазой хотя бы незначительного ее количества в поликристаллическом состоянии давало возможность более точного определения параметров решетки фазы.

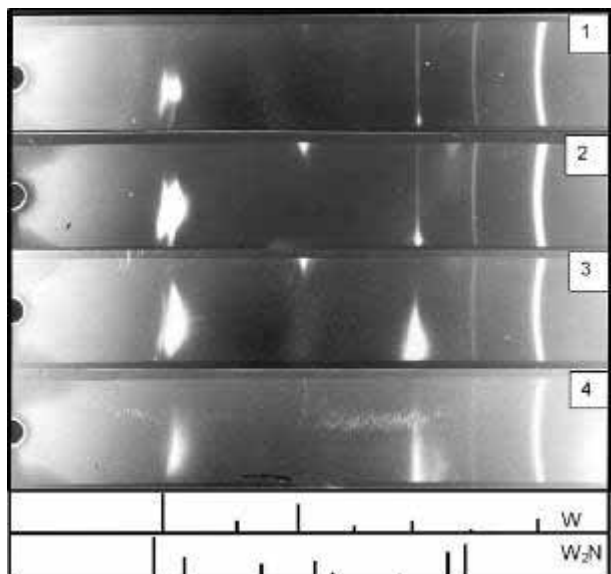


Рисунок 1. Рентгенограммы поверхности вольфрама, имплантированного ионами азота дозой $1,87 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ при углах съемки 3(1), 6(2), 9(3) и 15° (4)

Отжиг приводит к сужению отражений на рентгенограммах, что свидетельствует об упорядочении структуры и укрупнении частиц возникающей фазы. Наряду с этим, отжиг при температурах, превышающих 900°C , ведет дополнительно к образованию фазы WO_3 моноклинной структуры, которая возникает в результате частичного окисления поверхности образца в атмосфере остаточных газов печи. Можно отметить, что различные металлы после ионной имплантации по разному ведут себя по отношению к остаточным газам при отжиге. Это зависит как от вида металла, так и от типа используемых ионов [7]. Молибден проявляет большую склонность при отжиге связываться с углеродом, образуя карбид молибдена. В то же время образование окислов при отжиге ионно-имплантированного молибдена замечено не было [1].

При внедрении ионов кислорода уже при дозе Φ_1 на рентгенограммах возникают отражения от текстурированной со следами поликристалла фазы с ГЦК-структурой, которая, однако, не переходит в поликристаллическое состояние с увеличением дозы имплантации (Рис. 2). Параметр решетки этой фазы, рассчитанный по слабым линиям ее поликристаллической составляющей составил $4,155 \text{ \AA}$.

Последующий отжиг особых изменений в наблюдаемую картину не вносит вплоть до 900°C . При достижении этой температуры на рентгенограммах появляется дополнительный набор линий от поликристаллической фазы WO_3 , но не моноклинной, как в случае имплантации азота, а гексагональной структуры. Последующий отжиг при 1000°C приводит к распаду этой фазы и появлению вместо нее поликристаллического карбида вольфрама W_2C гексагональной структуры; при этом ГЦК-фаза, воз-

никающая после имплантации, в процессе отжигов не распадается.

Анализ полученных результатов приводит к следующему. Отношения атомных радиусов азота и кислорода к радиусу вольфрама составляют 0,50 и 0,43, соответственно. В этом случае, согласно выдвинутыми нами ранее предположениями [1], основанными на правиле Хэгга [2] при имплантации должны образовываться простые плотноупакованные структуры, что и подтвердилось в данной работе. По литературным данным [6] среди известных нитридов единственной фазой, имеющей плотноупакованную структуру, является фаза W_2N . По этой причине, по-видимому, имплантация ионов азота приводит к образованию лишь фазы W_2N с ГЦК-решеткой, хотя при используемых дозах следовало бы ожидать также появление фазы WN с более высоким содержанием азота.

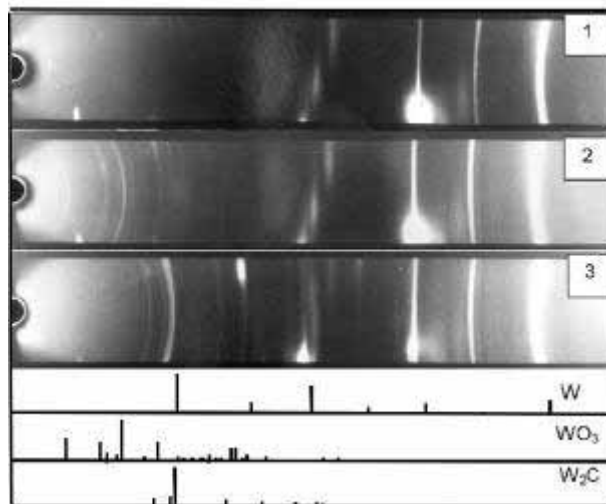


Рисунок 2. Рентгенограммы поверхности вольфрама, имплантированного ионами кислорода дозой $5,6 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ после имплантации (1), а также последующего отжига при 900°C (2) и 1000°C (3) при угле съемки 6°

В случае имплантации ионов кислорода образуется фаза с плотноупакованной ГЦК-структурой, близкая по структуре и параметрам к W_2N . Вместе с тем, процессы фазообразований в образцах, имплантированных азотом и кислородом, отличаются как по дозовой зависимости, так и по поведению при последующем отжиге. Так, например, в случае азота увеличение дозы имплантации приводит к изменению состояния появляющегося нитрида вольфрама от текстуры к поликристаллу, в то время как при имплантации кислорода фаза появляется только в текстурированном состоянии и сохраняется в таком виде при отжиге. Далее, при отжиге в случае азота при 900°C образуется оксид вольфрама WO_3 моноклинной структуры, тогда как в случае кислорода, хотя и образуется фаза WO_3 с аналогичным стехиометрическим составом, но другой структуры (гексагональной) и при другой температуре (1000°C). Третьей особенностью является то, что в первом

случае возникающий оксид распадется при последующем отжиге при 1000°C , а во втором – нет.

Следовательно, есть все основания предположить, что возникающая при имплантации вольфрама ионами кислорода фаза представляет собой оксид вольфрама W_2O с ГЦК-структурой и является аналогом фазы W_2N , в которой атомы азота заменены атомами кислорода. По литературным данным система $\text{W} - \text{O}$ характеризуется наличием оксидов WO_2 , $\text{W}_{18}\text{O}_{49}$, $\text{W}_{20}\text{O}_{58}$, WO_3 , среди которых обнаруженная структура отсутствует [6].

Что касается внедрения ионов азота в тантал, то на рентгенограммах появляется слабый набор линий от поликристаллической фазы, который представляет собой нитрид тантала TaN с плотноупакованной ГЦК-структурой. Вместе с этой фазой зарегистрирован также слабый набор линий от карбида тантала $\beta\text{-Ta}_2\text{C}$ с ГПУ-структурой, который возникает за счет имплантации методом отдачи углерода из атмосферы остаточных газов ускорителя. Получены рентгенограммы, на которых показаны рефлексы возникающих отражений. Их расплывчатость свидетельствует о степени разупорядоченности возникающей фазы, следы которой появляются уже при дозе Φ_1 , а при увеличении дозы до Φ_3 количество их в имплантированных слоях, судя по возрастанию интенсивности линий в имплантированных слоях, повышается. Послеимплантационный отжиг до 900°C не вносит существенных изменений, в то время как отжиг при 1000°C ведет дополнительно к образованию фазы Ta_2C , которая возникает в результате частичной карбидизации поверхности образца в атмосфере остаточных газов печи.

При внедрении ионов кислорода уже при дозе Φ_1 на рентгенограммах возникают отражения от фазы $\beta\text{-Ta}_2\text{C}$ от поликристаллической фазы с ГЦК-структурой ($a=4,24 \text{ \AA}$), количество которой возрастает с увеличением дозы имплантации.

В наблюдаемую картину последующий отжиг до 800°C не внес особых изменений. Отжиг при 1000°C приводит к распаду этой фазы и появлению

вместо нее поликристаллического карбида тантала Ta_2C ; при этом ГЦК-фаза, возникшая после имплантации, в процессе отжигов не распадается. По данным [6] среди известных нитридов единственной фазой, имеющей плотноупакованную структуру, является TaN . По этой причине, по-видимому, имплантация ионов азота приводит непосредственно к образованию фазы TaN с ГЦК-решеткой, хотя при малых дозах следовало бы ожидать появления фазы Ta_2N с более низким содержанием азота. Появление плотноупакованной фазы Ta_2C закономерно; такой же эффект наблюдался ранее на молибдене, независимо от вида имплантируемых ионов [1].

Интересный результат наблюдается при имплантации ионов кислорода. Здесь в процессе внедрения образуется фаза с плотноупакованной ГЦК-структурой, близкая по структуре и параметрам к Ta_2N . Однако, процессы фазообразования в образцах, имплантированных азотом и кислородом, отличаются при отжиге. Так, например, в случае азота образование карбида тантала в первом случае происходит при 1000°C , в то время как в образцах, имплантированных кислородом, этот процесс начинается уже при 800°C .

Есть все основания предположить, что возникающая при имплантации тантала ионами кислорода фаза представляет собой оксид тантала TaO , в которой атомы азота заменены атомами кислорода. По литературным сведениям система $\text{Ta}-\text{O}$ характеризуется наличием целого ряда оксидов, среди которых обнаруженная структура отсутствует [6].

Таким образом, полученные результаты не только подтверждают основные критерии относительно характера структурно-фазовых превращений при ионной имплантации, выдвинутые ранее [1], но и дают основание надеяться, что их использование позволят создавать новые структуры, образование которых другими методами не представляется возможным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kazdaev Kh.R., Akchulakov M.T., Bayadilov E.M. Synthesis of Compounds in Molybdenum During Ion Implantation Combined with Thermal and Pulsed Electron Annealing. // Phys.Research. 1990. V.13. p.293.
2. Гольдшмидт Х. Джю. Сплавы внедрения. М.: Мир, 1971. 424с.
3. Смитлз К. Дж. Металлы: Справоч.изд. Пер. с англ. 1980, 447 с.
4. Кумахов М.А., Муралев В.А., Аверьянов Е.Г., Симонов В.А., Хавкин Л.П. Проективные пробеги и разбросы пробегов для 1240 комбинаций ион-мишень в интервале энергий $20\text{кэВ} \leq E \leq 1000 \text{ кэВ}$. М., 1974, 266 с.
5. Абашина А.В., Акчулаков М.Т., Кадыржанов К.К., Каздаев Х.Р., Мелихов В.Д. Рентгеноструктурный анализ поверхности молибдена, имплантированного ионами углерода. //Поверхность. 1987. №4. С.62.
6. Барабаш О.М., Коваль Ю.Н. Структура и свойства металлов и сплавов. Наукова думка. Киев. 1986. 599с.
7. Тюменцев А.Н., Коротаев А.Д., Бугаев С.П. Закономерности структурно-фазовых превращений в металлических сплавах при высокодозной ионной имплантации. //Изв.вузов. Физика. 1994. №5. С.59-71

**ОЦК-ҚҰРЫЛЫМДАҒЫ МЕТАЛЛДАРЫНДЫ ³ ИОНДЫҚ
ИМПЛАНТАЦИЯ КЕЗІНДЕГІ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ-ФАЗАЛЫҚ ТҮРЛЕНУЛЕРІ**

Р.Б. Абылқалықова, М.К. Сқақов

Шығыс Қазақстан мемлекеттік университеті, Өскемен қаласы

Азот немесе оттегі иондары арқылы ОЦК-вольфрам және тантал енгізу тығыз қапталған ГЦК-құрылымдардың пайда болуына әкелетіні көрсетілген. Азот болған жағдайда әбден әйгілі W_2N вольфрам нитридi және TaN тантал нитридi қалыптасады. Оттегіні алғанда пайда болушы фазаны осындай W_2O вольфрам тотығы және TaN тантал тотығы ретінде сәйкестендіруге болады.

STRUCTURE AND PHASE TRANSFORMATIONS AT THE BCC-METALLS BY ION IMPLANTATION

R.B. Abylkalykova, M.K. Skakov

East-Kazakhstan State University, Ust-Kamenogorsk

It is shown that implantation of tungsten and tantalum by nitrogen or oxygen ions leads to close packed structures fcc-structures formation. In the case of nitrogen the well known tungsten nitride W_2N and nitride tantalum Ta_2N is formed. In the case of oxygen the arising phase may be identified as structure tungsten oxide W_2O and oxide TaO .

УДК 669.715:541,6:539.55:537.312.6

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ СТРУКТУР И СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ СПЛАВА НА NI-CR ОСНОВЕ

Ерболатулы Д., Скаков М.К., Алонцева Д.Л., Гребнева В.С.

Восточно-Казахстанский государственный университет, г. Усть-Каменогорск

В статье представлены способы механико-термической обработки сплава 40ХНЮ, приводящие к формированию мелкозернистой структуры со сверхпластическими свойствами. Изучены структурные состояния сплава после этих обработок. Установлены температурно-скоростные интервалы проявления сверхпластичности и определены оптимальные условия деформации сплава 40ХНЮ с развитой микродуплексной структурой.

Дисперсионно-твердеющие жаропрочные сплавы на Ni-Cr основе труднодеформируемы, что повышает трудоемкость и снижает эффективность их обработки. Одним из направлений повышения технологической пластичности никель-хромовых сплавов может быть перевод их в сверхпластическое состояние. Известно [1], что сверхпластичность проявляется в термически стабильных ультрамелкозернистых материалах в определенном температурно-скоростном интервале. Наиболее благоприятной для реализации сверхпластичности является двухфазная микродуплексная структура, в которой рост зерна одной фазы сдерживается второй фазой. При этом границы между фазами должны быть большеугловыми, чтобы обеспечить развитие зернограничного проскальзывания.

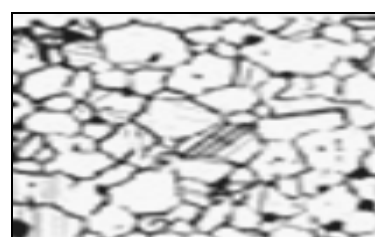
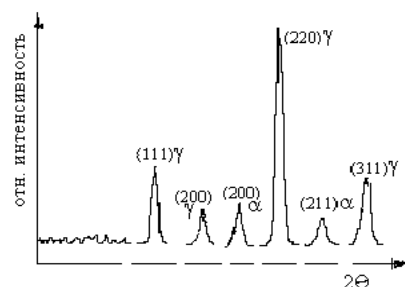
В связи с вышесказанным в настоящей работе исследовались особенности формирования ультрамелкозернистой микродуплексной структуры при механико-термической обработке и оптимальные температурно-скоростные режимы сверхпластичности сплава 40ХНЮ.

Выбранный нами для исследования промышленный дисперсионно-твердеющий сплав 40ХНЮ (в % по массе: Cr - 39,5; Al - 3,75; C - 0,015; остальное – Ni) закаливали в воде от 1050°C (выдержка 5 мин.), прокатывали с $\varepsilon=90\%$ и отжигали при температурах 550 (1,5ч) и 900°C (1ч.), также партию закаленных образцов после прокатки с $\varepsilon=90\%$ испытывали на одноосное растяжение при повышенных температурах (800-1100°C) и с различными скоростями деформации. Определяли относительное удлинение после разрыва δ и предел прочности σ_B . Методом скачкообразного изменения скорости растяжения оценивали параметр чувствительности деформирующих напряжений к скорости деформации $m = \frac{d \lg \sigma}{d \lg \dot{\varepsilon}}$. Структуру и фазовый состав сплава

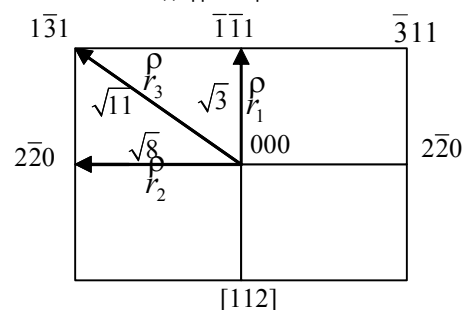
после закалки, прокатки, отжига и высокотемпературного растяжения исследовали металлографически, методами рентгенографии и электронной микроскопии.

Из данных представленных на рисунке 1 видно, что структура закаленного сплава 40ХНЮ пред-

ставляет собой γ -пересыщенный твердый раствор на основе Ni ($a=3,597\text{\AA}$) с небольшим количеством частиц первичной α -фазы на основе Cr ($a=2,885\text{\AA}$).

микроструктура, $\times 250$ микродифракция от γ -зерна

дифрактограмма



[112]

схема расшифровки электронограммы

Рисунок 1. Структура сплава 40ХНЮ после закалки от 1050°C (5 мин.)

Исследование структуры прокатанного сплава 40ХНЮ показало, что деформация с $\varepsilon=90\%$ приводит к формированию фрагментированной структуры (Рис. 2). Структура материала фактически становится сверхмелкозернистой. Средний размер фрагментов, определенный методом произвольных секущих составил около 300 нм. Электронограмма принимает квазикольцевой вид.

При отжиге сплава, деформированного с $\varepsilon=90\%$ происходит комплексная непрерывная реакция рекристаллизации и распада, изученная в работе [2]. Процесс заключается в образовании α - и γ' -частиц на субграницах, в которые превращаются границы фрагментов. Благодаря ускоренной диффузии по дислокационным трубкам, частицы быстро растут и коагулируют, освобождаясь от частиц субграницы распадаются на отдельные дислокации - происходит коалесценция субзерен. Процесс продолжается вплоть до образования большеугловых границ. В результате развития такого процесса в сплаве 40ХНЮ формируется структура «микротриплекс» (Рис. 3, а), которая была ранее изучена в работе [2]. После отжига при 550°C (1,5ч.) структура сплава состоит из зерен α ($a=2,8836\text{\AA}$)-, γ ($a=3,5640\text{\AA}$)- и γ' (Ni_3Al) ($a=3,5337\text{\AA}$)- фаз (Рис. 3, б).

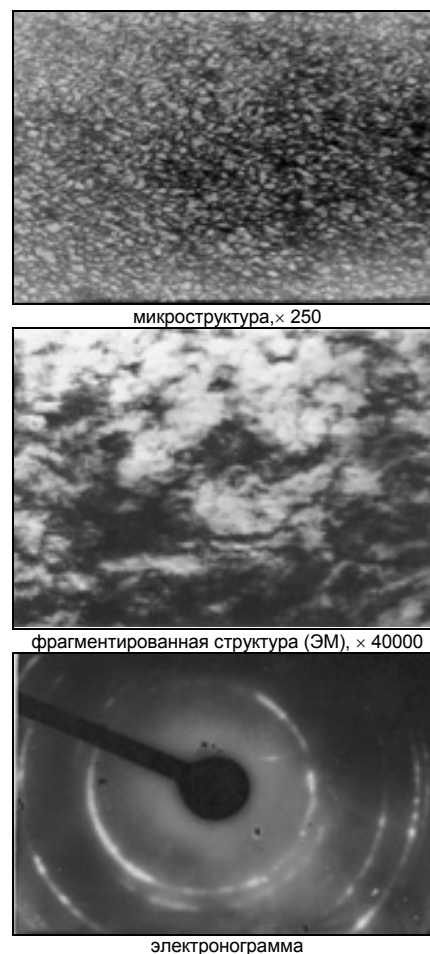
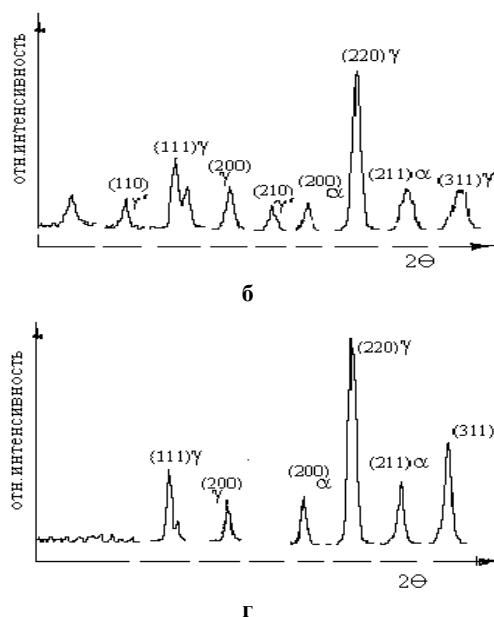
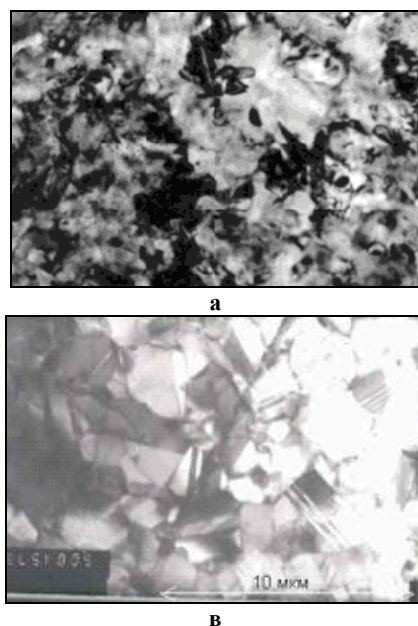


Рисунок 2. Структура сплава 40ХНЮ, обработанного по режиму: закалка от 1050 °С (5мин) + прокатка с $\varepsilon=90\%$



а – структура «микротриплекс» в сплаве прокатанном на 90% и отожженном при 550°C (1,5ч.); б – дифрактограмма сплава прокатанного на 90% и отожженного при 550°C (1,5ч); в – структура «микродуплекс» в сплаве, прокатанном на 90% и отожженном при 900°C (1ч.), $\times 4\,000$; г) - дифрактограмма сплава прокатанного на 90% и отожженного при 900°C (1ч)

Рисунок 3. Структура отожженного сплава 40ХНЮ

При увеличении температуры отжига прокатанного сплава до 900°C γ' -фаза растворяется в матрице и практически образуется двухфазная структура «микродуплекс», состоящая из γ - и α -зерен (см. рисунок 3 в, г). Период решетки γ -фазы составляет 3,5796 Å, а α -фазы 2,885 Å.

Ранее в работе [3] сверхпластичность сплава 40ХНЮ наблюдали у предварительно прокатанного с $\varepsilon=70\%$ после закалки от 1250°C (2 мин) при деформировании материала при температуре 900°C со скоростью $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$.

Настоящие исследования структуры и свойств сплава 40ХНЮ показывают, что предварительная обработка, а именно: закалка от 1050°C (5 мин) + прокатка с $\varepsilon = 90\%$ при последующем высокотемпературном растяжении обеспечивает возникновение сверхпластичности сплава в интервале скоростей деформации $10^{-4} - 10^{-2} \text{ с}^{-1}$, и в интервале температур 850- 1050°C. Основные показатели сверхпластичности сплава 40ХНЮ, а именно: параметр чувствительности напряжения течения к скорости деформации $m>0,6$ и относительное удлинение после разрыва $\delta>1600\%$ (больше значения

аналогичной величины в работе [3] - 800%) достигают максимальных значений при $T = 950 \div 1000^\circ\text{C}$ и скорости деформации $\dot{\varepsilon} \approx 9,3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Из полученных в настоящей работе данных следует, что сплав 40ХНЮ в состоянии сверхпластичности обладает относительно низкими напряжениями течения (5÷40 МПа), что является характерным для сверхпластического течения.

Таким образом, в настоящей работе показано, что с помощью подбора режимов термомеханической обработки можно повысить технологическую пластичность сплава путем перевода его в сверхпластическое состояние, изучены структурные особенности, приводящие к сверхпластичности сплава 40ХНЮ, в частности, микродуплексная структура. Достигаемый уровень высоких пластических свойств обеспечивает использование сплава в качестве конструкционного материала для упругих элементов ответственного назначения. Сверхпластическая деформация при этом может существенно упростить технологию обработки полуфабрикатов самой сложной конфигурации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов.-М.: Металлургия, 1984.-264 с.
2. Петров В.А., Строкатов Р.Д., Суховаров В.Ф. Комплексные реакции рекристаллизации и распада в Ni-Cr-Al сплаве.- ФММ,1983.-Т.57, С.127-130
3. Радашин М.В., Радченко О.А., Суховаров В.Ф., Петров В.А. Сверхпластичность сплава 40ХНЮ и ее использование в технологии производства упругих элементов приборов. Материалы 1-Респ. конференции «Физика твердого тела и новые области ее применения» -Караганда: -1986. С.35.

NI-CR НЕГІЗІНДЕГІ ҚОРЫТПАДАҒЫ УЛЬТРАДИСПЕРЛІК ҚҰРЫЛЫСТАРДЫҢ ПАЙДА БОЛУЫ ЖӘНЕ СОЛ ҚОРЫТПАНЫҢ АСҚЫН ПЛАСТИКАЛЫҚТЫҒЫ

Д. Ерболатұлы, М.К. Скаков, Д.Л. Алонцева, В.С. Гребнева

Шығыс Қазақстан мемлекеттік университеті, Өскемен қаласы

Мақалада асқынпластикалық қасиетті ұсақтүйіршікті құрылысына әкелетін 40ХНЮ қорытпасын механика термиялық өңдеу әдістері көрсетілген. Сол өңдеулерден кейін қорытпаның құрылысы зеттелген. Микродуплекс құрылыстық 40ХНЮ қорытпасының асқынпластикалықтық көсететін деформацияланудың температура-жылдамдықтық аралығы және оның ұтымды шарты анықталған.

PECULIARITIES OF SUPERDISPERSED STRUCTURES FORMING AND SUPERPLASTICITY OF NI-CR-BASED ALLOY

D. Erbolatuly, M.K. Skakov, D.L. Alontseva, V.S. Grebneva

East-Kazakhstan State University, Ust-Kamenogorsk

The effort addresses methods of thermal-mechanical treatment of 40ХНЮ alloy causing forming of a fine-grain structure with superplasticity features. Structural states of the alloy after treatments are studied. Temperature-velocity intervals of the superplasticity manifestation are specified and optimal conditions of the microduplex structure 40ХНЮ alloy deformation are identified.

УДК 539.21, 539.24, 539.26

ИЗУЧЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ ИЗ КАРБИДОВ НИОБИЯ И ТАНТАЛА, НАНЕСЕННЫХ НА ПОВЕРХНОСТЬ ГРАФИТОВОГО ТИГЛЯ, В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ПЛАВЛЕНИЮ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ¹Жданов В.С., ¹Шаповалов Г.В., ¹Окапбаев Р.А., ²Скаков М.К., ¹Уткелбаев Б.Д., ¹Коянбаев Е.Т.¹Институт атомной энергии ННЦ РК,²Восточно-Казахстанский государственный университет

В статье приведены результаты изучения стойкости защитных покрытий графитового тигля из карбидов ниобия и тантала в процессе плавления топливных смесей. Исследовалась стойкость покрытий, нанесенных методами химического осаждения и карбидизации танталовых вставок внутри тигля. Проведенные эксперименты показали, что в большинстве случаев расплав топлива не удается защитить от проникновения углерода из графитового тигля электроплавильной печи, в результате которого происходят высокотемпературные химические реакции восстановления, типа $UO_2 + 4C \rightarrow UC_2 + 2CO$ и $UO_2 + 3UC_2 \rightarrow 4UC + 2CO$. Для защиты расплава от взаимодействия с углеродом на внутреннюю поверхность тиглей наносились покрытия из карбидов ниобия и тантала. Показано, что эффективность защитных покрытий зависит от множества факторов, таких как способ нанесения покрытий, качество поверхности графита, толщина слоя, условия нагрева и т.д. Наиболее эффективной оказалось покрытие, полученное методом карбидизации металлической танталовой вставки при температуре около 2700К.

Для изучения поведения расплавленного ядерного топлива во вне реакторных экспериментах по моделированию тяжелых аварий в ядерных реакторах часто используется метод индукционного нагрева графитового тигля. Графит, температура плавления которого составляет 3850°C, является термически устойчивым в области температуры плавления топлива из диоксида урана (2850°C). Однако при температурах выше 2000°C значительно возрастает химическая активность углерода, проникающего в материал из тигля. В результате химических реакций топлива с углеродом происходит интенсивная эрозия графитового тигля и изменение фазового состава топлива. В случаях, когда эрозия приводит к образованию сквозных отверстий в тигле, расплавленное топливо не удастся удержать в экспериментальном объеме. Кроме этого, топливо карбидизируется и изменяет свои теплофизические свойства, что недопустимо в экспериментах, основной целью которых является моделирование поведения расплавленного топлива с максимальным приближением к реакторным условиям.

Одним из основных способов уменьшения прямого взаимодействия между загружаемой шихтой и тиглем электроплавильной печи является нанесение защитных покрытий из тугоплавких материалов. Однако как показали эксперименты, защитные свойства покрытий не всегда удовлетворяют требованиям экспериментов. Основной проблемой использования покрытий является их преждевременное разрушение или растворение. Качество покрытий зависит от множества факторов, таких как, степень их адгезии, толщина и состав, состояние поверхности графитового тигля и т.д. Изучение закономерностей влияния этих факторов необходимы для совершенствования технологии нанесения защитных

покрытий и корректного проведения экспериментов с использованием метода индукционного нагрева материалов в графитовом тигле.

В данной статье приведены результаты изучения стойкости защитных покрытий графитового тигля из карбидов ниобия и тантала в процессе плавления топливных смесей. Исследовалась стойкость покрытий, нанесенных методами химического осаждения и карбидизации танталовых вставок внутри тигля.

В качестве объектов исследования использовались защитные покрытия, нанесенные на внутреннюю поверхность электроплавильных тиглей в экспериментах по плавлению UO_2 и смесей UO_2 с нержавеющей сталью. Исследования совместимости компонентов кориума с защитными покрытиями тиглей проводились на установке высокочастотного нагрева ИП1–60М, которая позволяет нагревать материалы до температуры свыше 3000°C. Температура нагрева загружаемых материалов определялась с помощью яркостного пирометра.

После выполнения высокотемпературных экспериментов проводился продольный разрез тиглей с затвердевшим расплавом, отбор образцов для исследования и их механическая шлифовка и полировка. С целью изучения внешнего вида образцов расплава проводились макросъемки. Микроструктура образцов исследовалась в оптическом микроскопе МБИ-15 при увеличениях 10÷100 крат. Элементный анализ проводится с помощью рентгеновского флуоресцентного сканирующего кристалл-дифракционного спектрометра «Спектроскан», с помощью которого можно определять усредненное содержание элементов от Са до U в приповерхностной области материала диаметром 10 мм. Фазовый состав материалов определялся с помощью рентгеновского дифрактометра «ДРОН-3». Проводилось

исследование стойкости защитных покрытий, нанесенных методами газозащитного осаждения и карбидизации металлических вставок.

ГАЗОФАЗНОЕ ОСАЖДЕНИЕ

При нанесении покрытий на графит методом газозащитного осаждения в качестве исходного продукта использовался пентахлорид ниобия. Слой покрытия в ряде случаев оказывался очень тонким и плохого качества, которое зависело от степени пористости и размера зерен графита. На рисунке 1 приведена микроструктура образца со стороны осажденной поверхности (а) и в поперечном его сечении (б). Видно, что поверхность образца имеет углубления и неровности. В поперечном сечении образца слой покрытия не был обнаружен: наблюдались только отдельные островки осажденного слоя. Однако в большинстве случаев покрытие имело удовлетворительное качество. Наилучшее качество покрытия наблюдалось, когда графит имел мелкие зерна и минимальную пористость. На рисунке 2 приведена микроструктура графитового образца, на поверхности которого образовался слой покрытия, толщиной около 25 мкм. На дифрактограмме данного образца наблюдались сильные линии NbC, что свидетельствует о хорошем качестве покрытия с точки зрения ее кристаллографии (Рис.3).

В эксперименте с плавлением диоксида урана в графитовом тигле, на который методом газозащитного осаждения было нанесено покрытие из карбида ниобия, наблюдалась значительная эрозия тигля (Рис.4). Никаких следов присутствия защитного покрытия на внутренней поверхности тигля после эксперимента не обнаружено. Затвердевший расплав был очень хрупким и легко крошился на мелкие кусочки. Результаты проведенного рентгеноструктурного фазового анализа показали, что расплав состоит из дикарбида (UC_2) и монокарбида урана (UC) с объемными долями, приблизительно 60% и 40%, соответственно. Данные измерения плотности материала (11.4 г/см^3) подтверждают возможность такого соотношения объемных долей UC_2 и UC. Полная карбидизация диоксида урана, наблюдаемая в данном эксперименте, является свидетельством незащищенности расплава от проникновения углерода, т.е. покрытие оказалось недостаточно стойкой при высоких температурах. Анализ полученных результатов фазового состава расплава показал, что образование карбидов UC и UC_2 может быть в результате двух химических реакций [1, 2]: $UO_2 + 4C \rightarrow UC_2 + 2CO$ и $UO_2 + 3UC_2 \rightarrow 4UC + 2CO$. В результате этих процессов значительно изменяются свойства топливного материала. Следует отметить, что монокарбид урана имеет гранецентрированную кубическую решетку и рентгенографическую плотность $13,68 \text{ г/см}^3$, температура плавления которого составляет 2490°C [3]. Дикарбид урана представляет собой соединение с гранецентрированной тетрагональной решеткой и

плотностью - $9,97 \text{ г/см}^3$ с точкой плавления - 2450°C [4]. Такое изменение теплофизических свойств топливного материала недопустимо для некоторых экспериментов по моделированию тяжелых аварий.

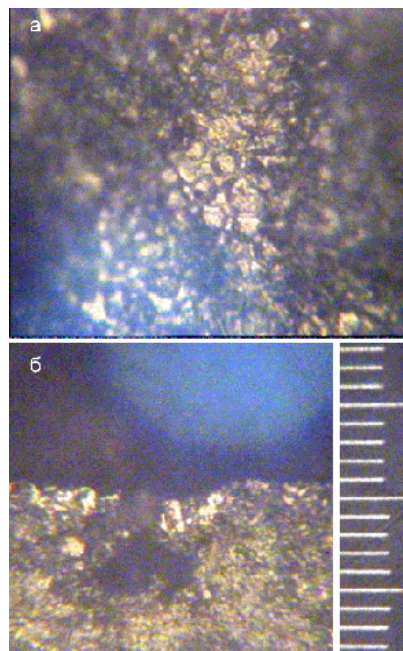


Рисунок 1. Микроструктура образца графита с покрытием из карбида ниобия, полученная методом газозащитного осаждения, со стороны внутренней его поверхности и (а) в поперечном сечении (б)

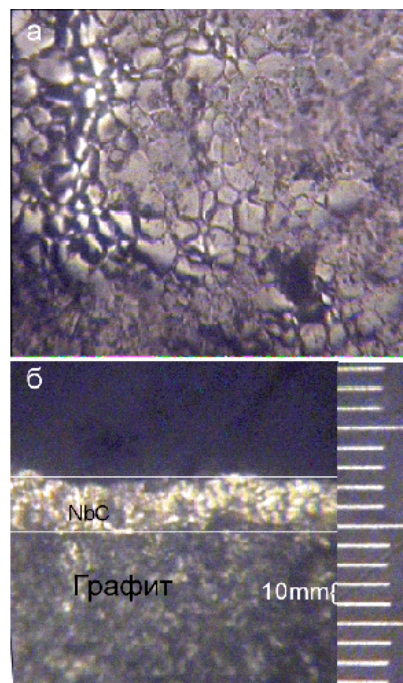


Рисунок 2. Микроструктура поверхности (а) и поперечного сечения (б) графитового образца с покрытием, полученным методом газозащитного осаждения

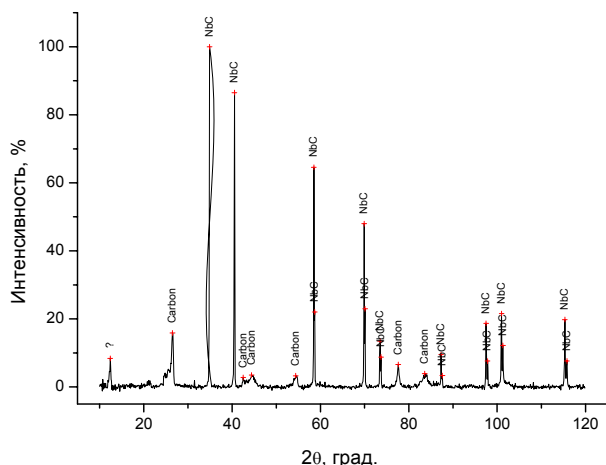


Рисунок 3. Рентгеновская дифрактограмма покрытия, полученного методом газозащитного осаждения.



Рисунок 4. Область эрозии графитового тигля с покрытием из карбида ниобия, нанесенным методом газозащитного осаждения

КАРБИДИЗАЦИЯ ТАНТАЛОВЫХ ВСТАВОК

Для изучения возможности создания защитного карбидного слоя путем карбидизации металлического тантала были проведены эксперименты по термообработке танталовой вставки, толщиной 0,8 мм, внутри тигля изображенного на рисунке 5. Внутренняя полость вставки заполнялась пенографитом или порошок графита в качестве дополнительного источника углерода для карбидизации тантала. Температура расплава измерялась оптическим пирометром по модели абсолютно черного тела – замкнутой полости, образованной поверхностью крышки тигля, стенками трубки и дном тигля. Карбидизация осуществлялась при температурах 800°C с выдержкой в течение 30 минут в вакууме при давлении 100 Па и при 3000°C – 45 минут в среде гелия с избыточным давлением 0,03 МПа. После проведения экспериментов вставка приобрела золотистый цвет,

что соответствует цвету TaC. Были проведены также эксперименты по изучению возможности карбидизации тантала внутри графитового тигля в условиях, когда вставка загружена материалами плавления. Эксперименты показали, что если карбидизация проводится при температуре 2500°C, а плавление шихты при 3000°C, то одновременно с карбидизацией происходит нежелательное взаимодействие тантала с материалами шихты. Для устранения этого взаимодействия температура химико-термической обработки тантала в углеродосодержащей среде максимально снижалась. При этом длительность термообработки увеличивалась. Было установлено, что снижение температуры карбидизации танталовой вставки, загруженной UO_2 , цирконием и сталью, действительно уменьшает степень взаимодействия защитного слоя с материалами плавления. В этих экспериментах была достигнута полная карбидизация танталовых вставок.

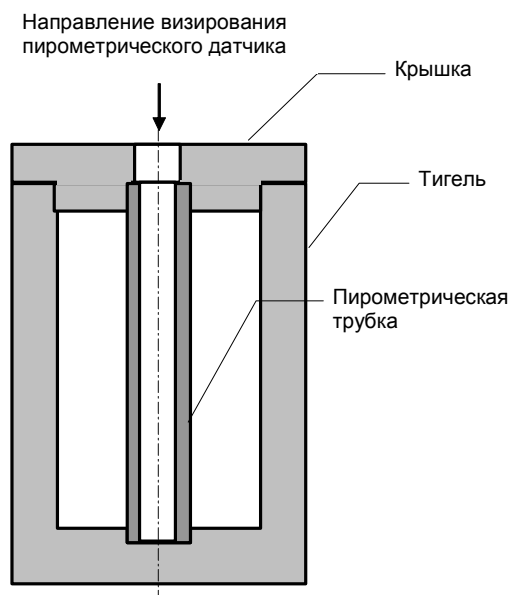


Рис.5. Устройство графитового тигля, предназначенного для экспериментов с танталовыми вставками.

После продольной разрезки тигля обнаружена незначительная эрозия внутренней поверхности тигля (Рис. 6). При этом была обнаружена локальная эрозия на боковой стенке тигля выше уровня затвердевшего расплава (область А). Это связано с повреждением защитного покрытия в этой области тигля.

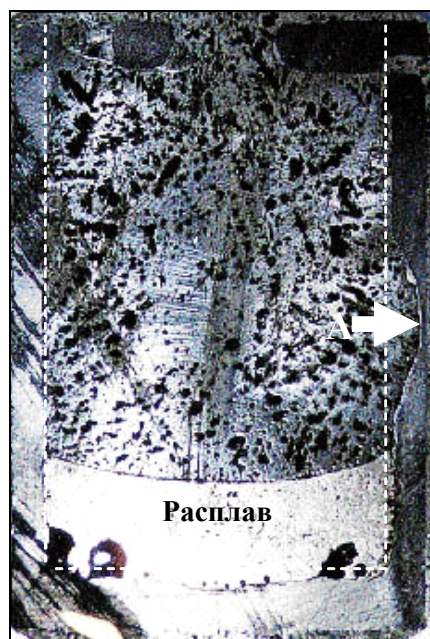


Рисунок 6. Продольный разрез затвердевшего слитка расплава топливной смеси с графитовым тиглем

Выводы

Таким образом, на основании проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

- Эксперименты по нанесению покрытий из карбида ниобия на графитовую поверхность с использованием метода газофазного осаждения показали, что качество покрытия зависит от степени пористости и размера зерен графита. Покрытие имеет наилучшее качество, когда графит имеет мелкие зерна и минимальную пористость. Однако при использовании тигля с покрытием, нанесенном методом газофазного осаждения для плавления диоксида урана, происходит полная карбидизация топлива и сильная эрозия тигля.
- Серия экспериментов с нанесением покрытий из карбида тантала путем карбидизации металлических танталовых вставок внутри графитового тигля показали меньшую эрозию стенок тигля по сравнению с эрозией тигля с покрытием из карбида ниобия, нанесенным методом газофазного осаждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котельников Р.Б., Башлыков С.Н., Каштанов А.И., Меньшикова Т.С. Высокотемпературное ядерное топливо. М., Атомиздат, 1978, 432с.
2. Уткелбаев Б.Д., Коянбаев Е.Т., Кукушкин И.М. Изучение взаимодействия диоксида урана с углеродом. Труды II конференции-конкурса НИОКР молодых ученых и специалистов НЯЦ РК, 2002, с.493-504.
3. Воронов Н.М. и др. Высокотемпературная химия окислов урана и их соединений. М. Атомиздат, 1971.
4. Стормс Е. Тугоплавкие карбиды. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1970

ОТЫН ҚОСПАСЫН БАЛҚЫТУ БОЙЫНША ТӘЖРИБЕДЕГІ ГРАФИТТІ ТИГЛДІҢ ЖОҒАРҒЫ БЕТІНЕ ТҮСКЕН, ТАНТАЛ МЕН НИОБИЙ КАРБИДІНЕН ТҰРАТЫН ҚАПТАМАНЫҢ ҚОРҒАНЫС ҚАСИЕТІН ЗЕРТТЕУ

¹⁾В.С. Жданов, ¹⁾Г.В. Шаповалов, ¹⁾Р.А. Окапбаев, ²⁾М.К. Скаков, ¹⁾Б.Д. Уткелбаев, ¹⁾Е.Т. Коянбаев

¹⁾ҚР ҰЯО атом энергиясы институты,
²⁾Шығыс –Қазақстан мемлекеттік университеті

Мақалада отын қоспасын балқыту процесіндегі тантал мен ниобий карбидінен тұратын графитті тиглдің қорғанысты қапталу төзімділігін зерттеу нәтижелері берілген. Мұнда тигл ішіндегі танталды қондырғының карбидизациясы және химиялық тұндыру әдісімен алынған қапталу төзімділігі зерттелген. Жүргізілген тәжірибелер көрсеткендей, көп жағдайда отынның балқуы электрлі балқыту пешінде графиттік тиглден тұратын көміртегінің енуінен қорғалмайды, соның нәтижесінде қалпына келудің мынандай $UO_2 + 4C \rightarrow UC_2 + 2CO$ және $UO_2 + 3UC_2 \rightarrow 4UC + 2CO$ жоғары температуралы химиялық реакциясы жүреді. Тиглдың ішкі жоғарғы бетінде көміртегінің өзара әрекет жасауынан балқуды қорғау үшін тантал мен ниобий карбидінен тұратын қаптама жасалған. Қорғаныс қаптамасының тиімділігі көптеген фактілерге тәуелді болады, атап айтқанда қыздыру жағдайы, қабат қалыңдығы, графиттің жоғарғы бетінің сапасы, қаптама жасау әдісі т.б.. 2700К шамасындағы температурада металлды тантал қондырғысын карбидизациялау әдісімен алынған қаптама біршама тиімді болып табылады.

**STUDYING OF PROTECTIVE PROPERTIES OF NIOBIUM AND TANTALUM
CARBIDE COATINGS SUPERIMPOSED TO THE GRAPHITE CRUCIBLE SURFACE
IN EXPERIMENTS ON MELTING OF FUEL MIXTURE**

¹V.S. Zhdanov, ¹G.V. Sapovalov, ¹R.A. Okapbaev, ²M.K. Skakov, ¹B.D. Utkelbayev, ¹E.T. Koyanbaev

¹*Institute of Atomic Energy NNC RK,*

²*East Kazakhstan State University*

The data of stability of niobium and tantalum carbide coating superimposed to the graphite crucible of the electro-melting furnace at fuel mixture melting are presented in paper. Coating stability superimposed in crucible inside by chemical sedimentation and carburization of tantalum inserts was investigated. The carried out experiments have shown that in most cases it is not possible to protect fuel melt from carbon penetration from graphite crucible as a result which there are high-temperature chemical reactions of restoration such as $\text{UO}_2 + 4\text{C} \rightarrow \text{UC}_2 + 2\text{CO}$ and $\text{UO}_2 + 3\text{UC}_2 \rightarrow 4\text{UC} + 2\text{CO}$. For protection of melt from interaction with carbon niobium and tantalum carbide coatings were superimposed on an internal surface of crucible. It is shown that efficiency of coating depends on set of factors such as a way of its superimposing, quality of graphite surface, thickness of a layer, a condition of heating, etc. The most effective appeared the coating obtained by a carburization method of metal tantalum insert at temperatures about 2700K.

УДК 539.21, 539.24, 539.26

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ЗАТВЕРДЕВШЕГО РАСПЛАВА ТОПЛИВНОЙ СМЕСИ ПОСЛЕ ЕГО ПОВТОРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

¹⁾Васильев Ю.С., ²⁾Уткелбаев Б.Д., ²⁾Коянбаев Е.Т., ²⁾Окапбаев Р.А.¹⁾Национальный ядерный центр РК,
²⁾Институт атомной энергии ИЯЦ РК

В статье приведены результаты исследования структурно-фазовой стабильности расплава смеси диоксида урана, диоксида циркония и нержавеющей стали после первичного и вторичного плавления. Исследование проводилось методами оптической металлографии, измерения плотности, изучения элементного и фазового состава материала. Результаты исследования показали, что при затвердевании смеси $\text{UO}_2\text{-ZrO}_2$ -нержавеющая сталь после первичного плавления формируются в основном соединения UF_6C_2 , UC_2 , ZrC и графит; после повторного плавления материала затвердевшего расплава его фазовый состав практически не изменился - замечено только некоторое увеличение содержания графита. Температура начала вторичного плавления расплава соответствует температуре плавления фазы UF_6C_2 .

Основной опасностью при тяжелых авариях с плавлением топлива в энергетических ядерных реакторах на быстрых нейтронах является вероятность возникновения повторной критичности. Существует идея создания новой конструкции активной зоны ядерных реакторов, в которой исключена возможность возникновения повторной критичности. Суть идеи заключается в изменении конструкции активной зоны таким образом, чтобы в случае плавления топлива расплав удалялся из активной зоны реактора уже на ранней стадии аварии. Основной целью многих исследований является экспериментальная проверка этой идеи. Для моделирования различных сценариев тяжелых аварий в ядерно-энергетических установках широко используются компьютерные программы (коды), в основе которых заложены физические закономерности процессов плавления материалов активной зоны реактора, перемещения расплава и его взаимодействия с теплоносителем. Существуют сценарии аварий, когда расплав на какое-то время может затвердеть и затем вновь расплавиться. Для корректного моделирования процесса повторного плавления надо быть уверенным в том, что теплофизические свойства расплава являются стабильными. Степень изменения свойств расплава определяется его структурно-фазовой стабильностью при повторном термическом воздействии. Поэтому изучение микроструктуры, элементный и фазовый анализ расплава корнума после повторного плавления является весьма актуальной материаловедческой задачей. В данной статье приведены результаты исследования структурно-фазовой стабильности расплава смеси диоксида урана, диоксида циркония и нержавеющей стали после первичного и вторичного плавления.

Первичное плавление смеси 61,7 вес.% UO_2 , 17,2 вес.% ZrO_2 и 21,1 вес.% нержавеющей стали (НС) проводилось на специальном вне реакторном стенде при нагреве шихты до средней температуры 3300К в течение 15 минут. При вторичном плавлении в не-

большой графитовый тигель загружались гранулы расплава, затвердевшего после первичного плавления смеси, размер которых не превышал 2 мм. В нижней части тигля установлена трубка с дополнительной термопарой, чтобы зарегистрировать начальную точку плавления материала. Шихта нагревалась до 2930К и выдерживалась при этой температуре течение 8 минут.

После высокотемпературных экспериментов проводилось комплексное исследование макро- и микроструктуры образцов затвердевшего расплава, их элементный и фазовый анализ, а также измерение плотности материалов. Для проведения исследований из различных участков слитка расплава вырезались образцы диаметром 10 мм и высотой 5-10 мм. Вырезанные образцы заливались серой в металлических держателях, затем механически шлифовались и полировались. Изучение микроструктуры образцов проводилось с помощью видеокамеры при увеличениях от 2 до 10 раз. Микроструктурные исследования выполнялись на оптическом микроскопе при увеличениях от 10 до 100 крат. Элементный состав исследуемых материалов определялся с помощью рентгеновского флуоресцентного спектрометра. Фазовый анализ материалов проводился с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3. Плотность материалов определялась путем гидростатического взвешивания образцов с помощью аналитических весов «Mettler Toledo». В качестве гидростатической жидкости использовалась дистиллированная вода.

Результаты исследования микроструктуры, элементного и фазового состава после первичного плавления смеси $\text{UO}_2\text{-ZrO}_2\text{-НС}$ показали, что затвердевший материал представляет собой практически однородный слиток темно-серого цвета. Внешний вид одного из образцов расплава показан на рисунке 1а. В микроструктуре образца расплава наблюдались темные включения и мелкие неоднородности (Рис.1б).

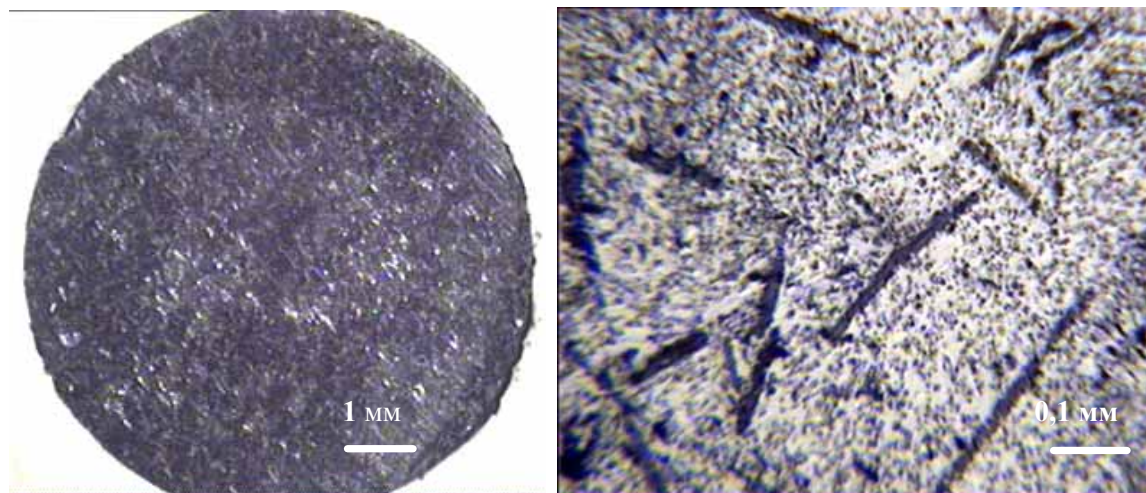


Рисунок 1. Макро- (а) и микроструктура (б) образца слитка, полученного в результате первичного плавления смеси UO_2 - ZrO_2 -НС

Результаты элементного анализа приведены на рисунке 2, где видно, что концентрация U составляет около 70%, а компоненты Zr и нержавеющей стали около 10% и 20%, соответственно. Присутствие небольшого количества тантала связано с растворением карбидного покрытия тигля.

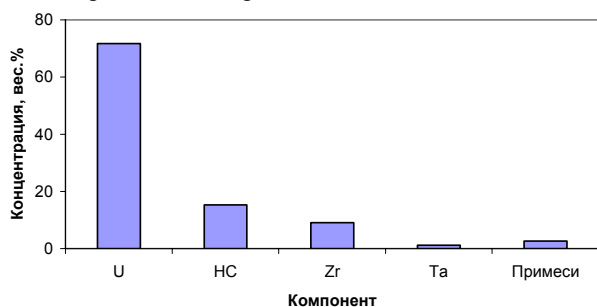


Рисунок 2. Элементный состав образца слитка, полученного в результате первичного плавления смеси UO_2 - ZrO_2 -НС

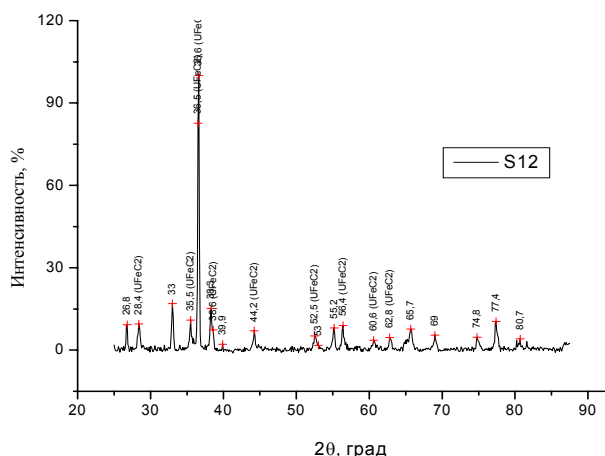


Рисунок 3. Дифрактограмма образца слитка, полученного в результате первичного плавления смеси UO_2 - ZrO_2 -НС

Результаты рентгеноструктурного фазового анализа данного образца приведены на рисунке 3 в виде дифрактограммы, где имеется множество линий, которые соответствуют таким соединениям, как $UFeC_2$, UC_2 и ZrC . На дифрактограммах образцов расплава также присутствовали линии графита.

Для проведения повторного плавления шихта тигля электроплавильной печи загружалась гранулами расплава, затвердевшего после первичного плавления топливной смеси. Шихта с гранулами нагревалась до 2930К и выдерживалась при этой температуре течение 8 минут. Диаграмма нагрева и охлаждения при повторном плавлении топливной смеси показана на рисунке 4. Измерение проводилось двумя датчиками. Верхняя кривая на диаграмме показывает изменение температуры шихты (датчик ТМ190). Ниже (прямые линии) на диаграмме показан режим изменения мощности электроплавильной печи.

В начальной стадии нагрева время первого всплеска температуры на термопаре трубки (15.56.10) соответствует температуре около 2020К, что является значительно ниже точек плавления диоксида и карбидов урана. Соединением, которое могло плавиться при этой температуре с учетом инерционности печи, является только фаза $UFeC_2$ с температурой плавления 1880К.

Структурное исследование материала после повторного плавления показало, что гранулы расплавились и образовали слиток расплава внутри тигля. Внешний вид разрезанного графитового тигля вместе с расплавом после его повторного плавления показан на рисунке 5. С помощью оптического микроскопа исследовались образцы расплава, отобранные из различных участков слитка. Можно видеть, что микроструктура этих образцов практически не отличается друг от друга. Следует отметить, каких либо существенных отличий в микроструктуре образцов после первичного и вторичного плавления также не обнаружено.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ЗАТВЕРДЕВШЕГО
РАСПЛАВА ТОПЛИВНОЙ СМЕСИ ПОСЛЕ ЕГО ПОВТОРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ**

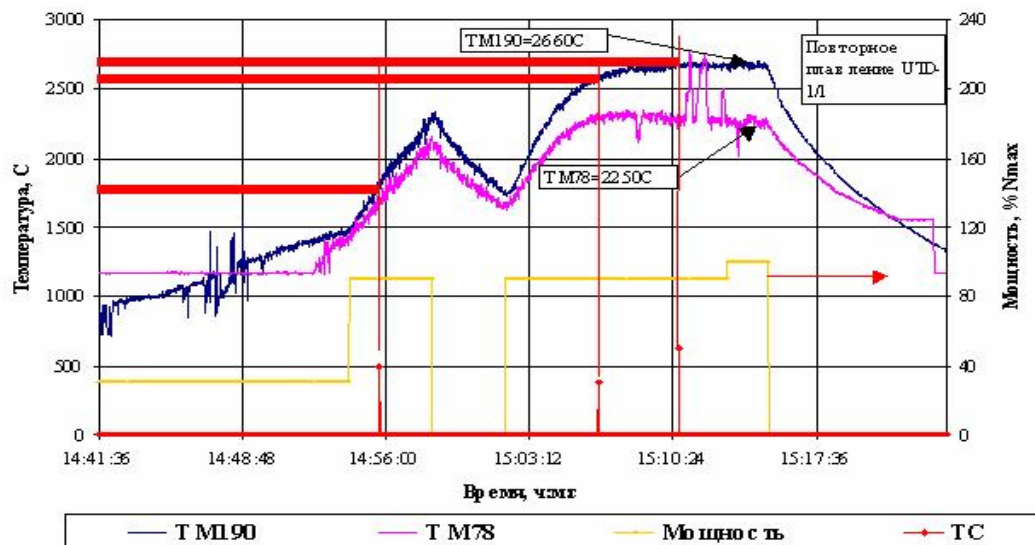


Рисунок 4. Диаграмма нагрева и охлаждения при повторном плавлении смеси UO_2-ZrO_2-HC

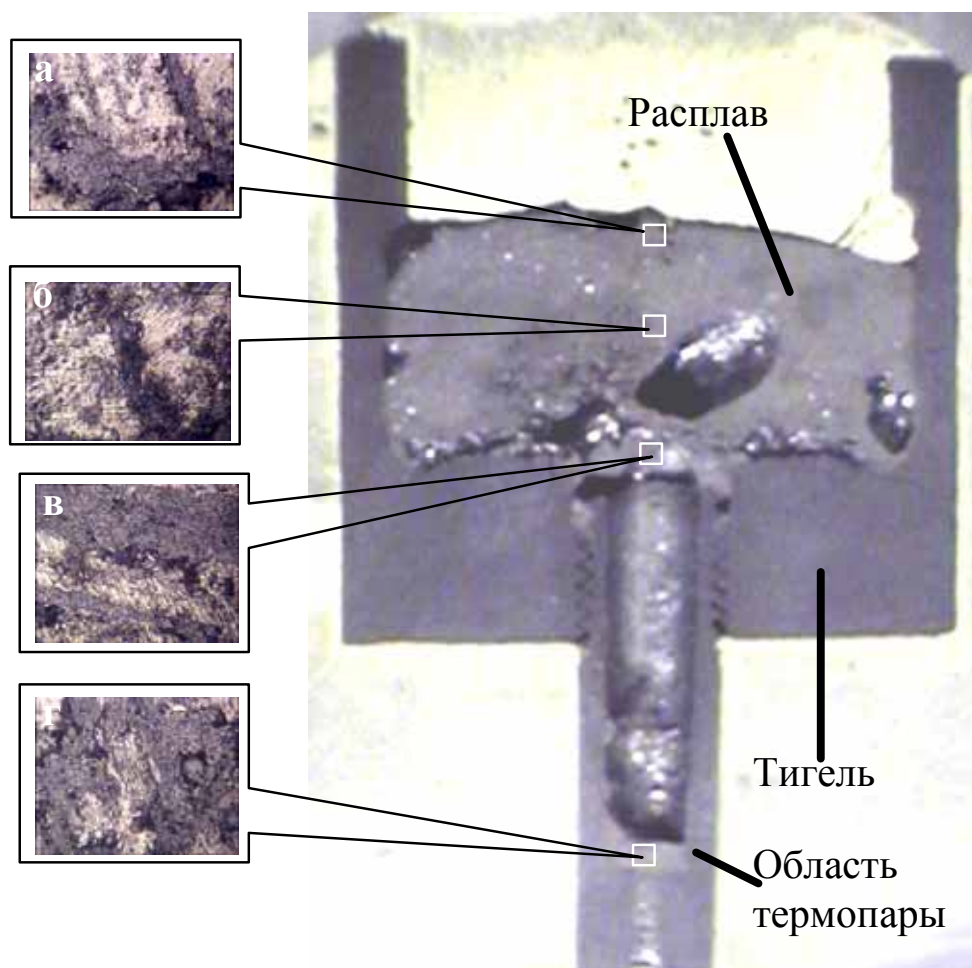


Рисунок 5. Разрез затвердевшего слитка расплава вместе с тиглем после повторного плавления смеси UO_2-ZrO_2-HC и микроструктура образцов, отобранных из различных участков слитка

После повторного плавления на дифрактограмме образцов затвердевшего расплава наблюдались линии $UFeC_2$, UC_2 , ZrC и графита (Рис.6). Все линии, которые были до повторного плавления, сохранились.

Только возросла 100% линия графита. Фактически это означает, что фазовый состав расплава после повторного плавления не изменился и остался таким же, каким он был после первичного плавления.

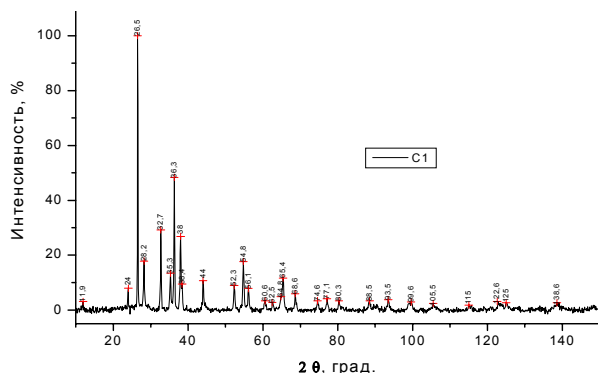


Рисунок 6. Дифрактограмма образца расплава после вторичного плавления смеси UO_2-ZrO_2-NC

Таким образом, на основании полученных результатов исследования структурно-фазовой стабильности расплава топливной смеси UO_2-ZrO_2 -нержавеющая сталь после ее первичного и вторичного плавления можно делать следующие выводы:

- при затвердевании материала после первичного плавления формируются соединения UF_6C_2 , UC_2 , ZrC и графит;
- после вторичного плавления фазовый состав материала практически не изменился - замечено только некоторое увеличение содержания графита;
- температура начала вторичного плавления материала соответствует температуре плавления фазы UF_6C_2 .

На основании полученных результатов можно выделить два важных момента. Во-первых, исследования показали, что повторное плавление не приводит к каким-либо качественным изменениям фазового состава расплава. Этот результат является положительным с точки зрения возможности моделирования тяжелых аварий во вне реакторных экспериментах. Во-вторых, обнаруженный экспериментальный факт уменьшения температуры плавления материала требует существенной корректировки теплофизических параметров, используемых при моделировании процесса перемещения расплава.

ҚАЙТАЛАП ЕРІТКЕННЕН КЕЙІНГІ ОТЫН КОСПАСЫНЫҢ ҚАТАЙҒАН БАЛҚУЫНЫҢ ФАЗАЛЫҚ ҚҰРАМЫН ЗЕРТТЕУ

¹⁾Васильев Ю.С., ²⁾Уткелбаев Б.Д., ²⁾Коянбаев Е.Т., ²⁾Окапбаев Р.А.

¹⁾ҚР Ұлттық ядролық орталығы
²⁾ҚР ҰАО атом энергиясы институты

Мақалада бастапқы және қайталап еріткеннен кейінгі тот баспайтын құрыш және циркония диоксиді, уран диоксиді бар коспалар балқуының құрылымды-фазалық тұрақтылығын зерттеу нәтижелері берілген. Зерттеу материалдың фазалық және элементті құрамын үйрену, тығыздығын өлшеу, оптикалық металлография әдістері арқылы жасалды. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, UO_2-ZrO_2 - коспасын қатайтқанда тот баспайтын құрыш алғашқы ерітуден кейін графит және мынандай негізгі коспалар UF_6C_2 , UC_2 , ZrC қалыптастырады; қатайған ертінді материалын қайталап еріткеннен кейін оның фазалық құрамы өзгерген жоқ – тек қана графит сақталуының артқаны байқалды. Балқудың қайталап еруінің бастапқы температурасы UF_6C_2 фазасының еру температурасына сәйкес келеді.

STUDY OF PHASE COMPOSITION SOLIDIFIED MELT OF FUEL MIXTURE AFTER ITS REPEATED MELTING

¹⁾Yu.S. Vasil'ev, ²⁾B.D. Utkelbayev, ²⁾E.T. Koyanbaev, ²⁾R.A. Okapbaev

¹⁾National Nuclear Center RK
²⁾Institute of Atomic Energy NNC RK

The research results of structural - phase stability of uranium dioxide, zirconium dioxide and stainless steel mixture after primary and secondary melting are presented in paper. Research was carried out by optical microscope, measurements of density, studying of element and phase distributions of material. Results of research have shown that The UF_6C_2 , UC_2 , ZrC compounds and graphite are formed at solidifying of UO_2-ZrO_2 - stainless steel mixture after primary melting; the phase composition of fuel material has not practically changed after secondary melting - some increase in the contents of graphite is noticed only. The temperature started secondary fuel melting corresponds to the UF_6C_2 phase melting point.

ПИСЬМО В РЕДАКЦИЮ

Заведомо благодарен всем, кто заинтересуется данной статьёй. Отзывы прошу посылать по адресу: 490009, Республика Казахстан, Восточно-Казахстанская область, г. Семипалатинск, до востребования, *Левицкий Владимир Владимирович*, e-mail: intcentr@rambler.ru

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ПОРТРЕТ АТОМА

Известно, что, будучи химиком, Д. И. Менделеев создавая таблицу периодической системы химических элементов, руководствовался возрастанием атомных масс. Физики дополнили значимость таблицы Д.И. Менделеева тем, что изучая строение атома, показали, что не атомная масса, а заряд является основой химического элемента, так как при одном и том же заряде возможна различная атомная масса, отсюда и понятие – изотопы. По таблице Д. И. Менделеева легко найти количество нейтронов любого атома по формуле: $A - Z = N$, где A – атомная масса; Z – заряд атома, который численно равен порядковому номеру элемента в таблице Д. И. Менделеева, а N –, как уже было сказано, количество нейтронов в атоме.

Всё вышеизложенное: есть прописная истина, доказанная всеми возможными доказательствами, поэтому таблица Д. И. Менделеева считается законом.

Однако, в таблице скрыта ещё одна истина. Судите сами: Анализируя химические элементы; $4/2$ Гелий; $12/6$ Углерод; $14/7$ Азот; $16/8$ Кислород и им подобные находим, что количество протонов и нейтронов у них равно. Получается, что атомы этих химических элементов сложены парами - протон - нейтрон. Но один протон и один нейтрон образуют дейтерий, стало быть, можно представить, что Гелий сложен из двух дейтериев, Углерод из шести, Азот из семи и так далее, то- есть количество дейтериев соответствует зарядовому числу элемента. Иное дело у химических элементов: $7/3$ Литий; $11/5$ Бор; $19/9$ Фтор и им подобных. Если и здесь объединять протон с нейтроном, то видно, что у них по одному свободному нейтрону, который может быть связан с любым из дейтериев, образуя фрагмент с одним протоном и двумя нейтронами. Но такой

фрагмент известен под названием тритий. Выходит, атом Лития сложен из одного трития и двух дейтериев; атом Бора из одного трития и четырех дейтериев и так далее. Получается, что у данных химических элементов количество дейтериев на единицу меньше зарядового числа, а количество тритиев соответствует числу свободных нейтронов. Из этого следует, чтобы найти количество тритиев в атомах химических элементов необходимо знать число свободных нейтронов. Проще всего это сделать, если предположить, что атом химического элемента сложен только из дейтериев. Тогда надо зарядовое число атома умножить на два и отнять от массового числа атома, то есть у Лития: три умножить на два - шесть; от семи отнять шесть - один; у Бора - пять умножить на два - десять; от одиннадцати отнять десять, - один и так далее. Заменяв название дейтерий на цифру два, а тритий, на цифру три, выше изложенное можно записать так: от массового числа атома химического элемента отнять удвоенное зарядовое число данного элемента, - остаток умножить на три и прибавить разность зарядового числа и остатка умноженную на два, или записать формулой: $A - 2Z = R$; $R \times 3 + (Z - R) \times 2$ Данным методом получается математический портрет атома всех химических элементов периодической таблицы Д.И. Менделеева. Математический портрет атома позволяет дать единственно правильную трактовку самых разнообразных атомных реакций и иметь наглядное представление о процессах происходящих в атоме, так как выявляет структуру атомов, а также содержимое атома, т.е.; фотонов, электронов, позитронов, мюонов, пионов и каонов.

СПИСОК АВТОРОВ

Абылкалыкова Р.Б., 62	Зазулин Д.М., 36	Павлов В.А., 41
Алдияров Н.У., 13	Зайцев В.Г., 41	Рыжих В.Ю., 13
Алонцева Д.Л., 66	Зарифов Р.А., 36	Сагиндыков Ш.Ш., 36
Басыбеков К.Б., 36	Кадыржанов К.К., 13	Скаков М.К., 62, 66, 69
Бичук Н.И., 41	Комлев В.Н., 41, 58	Такибаев Н.Ж., 5, 20
Бурминский В.П., 36	Коянбаев Е.Т., 69, 74	Тохтаров Р.Н., 36
Буртебаев Н., 36	Красовицкий П.М., 5	Тулеушев А.Ж., 26
Васильев Ю.С., 74	Левицкий В.В., 78	Тулеушев Ю.Ж., 26
Володин В.Н., 26	Ленник С.Г., 20	Уткелбаев Б.Д., 69, 74
Гребнева В.С., 66	Ливенцова А.С., 20	Чумаков Е.В., 32
Джазаиров-Кахраманов В.Дж., 36	Лисицын В.Н., 26	Шаповалов Г.В., 69
Ерболатулы Д., 66	Мелихова Г.С., 41	Якушев Е.М., 13
Жданов В.С., 13, 69	Окалбаев Р.А., 69, 74	

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи представляются до 25 числа первого месяца квартала в двух экземплярах на русском языке или в виде электронной копии (на гибком диске или по электронной почте присоединенным (attachment) файлом) в формате MS WORD версий 2, 6, 95, 97 или 2000 для Windows.

Текст печатается на листах формата A4 (210×297 мм) со свободными полями:

сверху25 мм;

снизу25 мм;

слева.....25 мм;

справа15 мм,

на принтере с высоким разрешением (300-600 dpi).

Используйте шрифты Times New Roman или аналогичные высотой 10 пунктов для обычного текста и 12 пунктов для заголовков.

Текст печатайте через один интервал, оставляя между абзацами 2 интервала.

Название статьи печатайте заглавными буквами. Пропустив 3 интервала после названия, печатайте Ф.И.О. авторов и наименования организаций, которые они представляют. После этого, отступив 3 интервала, печатайте основной текст.

Ответственный секретарь к.ф.-м.н. М.К. Мукушева
тел. (095) 745-54-04, (322-51) 2-33-35, E-mail: MUKUSHEVA@NNC.KZ

Технический редактор А.Г. Кислухин
тел. (322-51) 2-33-33, E-mail: KISLUHIN@NNC.KZ

Адрес редакции: 490060, Казахстан, г. Курчатов, ул. Ленина, 6.

© Редакция сборника «Вестник НЯЦ РК», 2001.

Регистрационное свидетельство №1203-Ж от 15.04.2000г.
Выдано Министерством культуры, информации и общественного согласия Республики Казахстан

Тираж 300 экз.

Выпуск набран и отпечатан в типографии
Национального ядерного центра Республики Казахстан
490060, Казахстан, г. Курчатов, ул. Ленина, 6.

