

ISSN 1729-7516

Вестник НЯЦ РК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 1(37), МАРТ 2009

Издается с января 2000 г.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР – д.ф.-м.н. КАДЫРЖАНОВ К.К.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: к.х.н. АРТЕМЬЕВ О.И., д.т.н. БАЙГУРИН Ж.Д.,
БЕЛЯШОВА Н.Н., к.ф.-м.н. ВОЛКОВА Т.В. к.т.н. ГИЛЬМАНОВ Д.Г.,
д.ф.-м.н. ЖОТАБАЕВ Ж.Р. – **заместитель главного редактора**, к.б.н. КАДЫРОВА Н.Ж.,
к.ф.-м.н. КЕНЖИН Е.А., д.ф.-м.н. МИХАЙЛОВА Н.Н., д.т.н. МУКУШЕВА М.К.,
д.б.н. ПАНИН М.С., к.г.-м.н. ПОДГОРНАЯ Л.Е., к.ф.-м.н. СОЛОДУХИН В.П. д.ф.-м.н. ТАКИБАЕВ Ж.С.

ҚР ҰЯО Жаршысы

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ
МЕРЗІМДІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛЫ

1(37) ШЫҒАРЫМ, НАУРЫЗ, 2009 ЖЫЛ

NNC RK Bulletin

RESEARCH AND TECHNOLOGY REVIEW
NATIONAL NUCLEAR CENTER OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ISSUE 1(37), MARCH 2009

Сообщаем Вам, что периодический научно-технический журнал "Вестник НЯЦ РК", решением Комитета по надзору и аттестации в сфере науки и образования включен в перечень изданий, рекомендованных для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций по физико-математическим наукам. В настоящее время редакция располагает возможностью быстрой публикации статей.

СОДЕРЖАНИЕ

ВЛИЯНИЕ ПОСТ-РАДИАЦИОННЫХ ОТЖИГОВ НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СТАЛИ 12X18H10T – МАТЕРИАЛА ЧЕХЛА ОТРАБОТАННОЙ ТЕПЛОЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ РЕАКТОРА БН-350	4
Цай К.В.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕНТГЕНОДИФРАКТОМЕТРИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ПРИ ДИФУЗИОННОМ ФАЗООБРАЗОВАНИИ В СИСТЕМЕ $Ve - Ti$.....	14
Антонюк В.И., Поляков А.Н., Поддубная Е.В., Слюсарев А.П., Иманбеков Ж.Ж., Жанкадамова А.М.	
ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УСКОРЕННЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ С ТОНКИМИ МИШЕНЯМИ	24
Горлачев И., Князев Б., Колобердин М., Лысухин С., Пеньков Ф.	
ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕАКТОРНОЙ ОТРАБОТКИ СТЕРЖНЕВЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ТВЭЛОВ ДЛЯ РЕАКТОРОВ ЯРД, ЯЭДУ И ЯГДУ	40
Дерявко И.И.	
РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОСНОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ЗАМЕНЫ ТОПЛИВА РЕАКТОРА ИВГ.1М.....	46
Пахниц В.А., Алейников Ю.В., Попов Ю. А., Прозорова И., Токтаганов М. О.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИ УДЕРЖАНИИ РАСПЛАВА КОРИУМА В КОРПУСЕ РЕАКТОРА (INVECOR)	55
Бакланов В.В., Жданов В.С., Малышева Е.В.	
ПОДДЕРЖИВАЮЩИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ В ОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО ТЕПЛОЫДЕЛЕНИЯ В ПРОЕКТЕ INVECOR.....	66
Бакланов В.В., Жданов В.С., Малышева Е.В., Кукушкин И.М., Игнашев В.И., Кукушкин М.И., Микиша А.В., Зверев В.В.	
ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЬЦЕВОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЗНЫХ ДИАПАЗОНАХ ГЛУБИН ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ И СИЛЬНЕЙШИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ	77
Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н.	
ВАРИАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ НА СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ: ЧАСТЬ 1. КОЭФФИЦИЕНТ ЛОДЕ-НАДАИ.....	86
Полешко Н.Н., Садыкова А.Б., Сыдыков А., Тимуш А.В. Хачикян Г.Я., Шацкилов В.И.	
ВАРИАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ НА СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ: ЧАСТЬ 2. АЗИМУТ ОСИ НАПРЯЖЕНИЯ СЖАТИЯ.....	93
Полешко Н.Н., Садыкова А.Б., Сыдыков А., Тимуш А.В. Хачикян Г.Я., Шацкилов В.И.	
НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭТАЛОННЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В СЕЙСМОМЕТРИИ	98
Янковский А. А.	
О РОЛИ АТОМНОГО ПРОЕКТА В РАЗВИТИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ НАУК	105
Васильев А.П.	

УДК 621.039.531: 621.78: 620.187.3

ВЛИЯНИЕ ПОСТ-РАДИАЦИОННЫХ ОТЖИГОВ НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СТАЛИ 12X18H10T – МАТЕРИАЛА ЧЕХЛА ОТРАБОТАННОЙ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ РЕАКТОРА БН-350

Цай К.В.

Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан

Рассматривается влияние пост-радиационных отжигов на микроструктуру и свойства стали 12X18H10T, облученной в области рефлектора активной зоны реактора БН-350 до повреждающих доз 7.3 и 12.6 сна при температурах, не превышающих 318°C. Отжиги проводили в температурном интервале 500-1050°C в течение 1 часа с последующей характеристикой состояния тонкой структуры методом просвечивающей электронной микроскопии. Полученные микроструктурные данные используются для объяснения изменений микротвердости и плотности облученной стали 12X18H10T в результате термической обработки.

ВВЕДЕНИЕ

Длительное нейтронное облучение приводит к деградации структуры и механических свойств металлов и сплавов, что сокращает структурную стабильность конструкций реакторных установок в долгосрочной перспективе [1-3]. Радиационно-индуцированное упрочнение материала, выражающееся через прирост таких механических характеристик как предел текучести $\sigma_{0.2}$ или микротвердость H_v , остается в последние три десятилетия одним из наиболее часто исследуемых эффектов в материаловедении реакторных материалов. Обычно эффект упрочнения описывается в рамках модели дисперсных барьеров [3-4], согласно которой структурные дефекты радиационной природы рассматриваются в качестве препятствий на пути дислокаций, движущихся в соответствующих плоскостях скольжения. При этом используются данные микроструктурных исследований, выполненных методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), по типам наблюдаемых радиационных дефектов, их средней плотности и размерам.

В рамках задачи продления срока службы реакторных материалов отжиг радиационного повреждения в области средних температур ($0.3-0.5 T_{an}$) часто рассматривают как возможный способ частичного восстановления структуры и свойств [5-8]. При этом заслуживающими внимания вопросами для подробного изучения являются определение интервалов температурно-временной стабильности подсистемы радиационных дефектов и кинетика восстановления механических свойств. Однако экспериментальной информации по влиянию пост-радиационного отжига на изменение дефектной микроструктуры пока недостаточно, тем более, что условия облучения в разных реакторных установках

приводят к значительной вариации состава радиационных дефектов, что в свою очередь, влияет на характер их поведения в ходе пост-радиационной термообработки. В работах [9-10] ранее детально исследовались изменения дефектной микроструктуры образцов стали 12X18H9T - материала стержня автоматического регулирования (АР) исследовательского реактора ВВР-К после серии пост-радиационных изохронных отжигов в интервале температур 450-1050°C. В настоящей работе целью исследований являлось изучение влияния пост-радиационных отжигов на микроструктуру стали 12X18H10T (материала шестигранного чехла бланкетной сборки реактора БН-350), облученной до различных повреждающих доз 7.3 и 12.6 сна при сравнительно низких значениях скоростей набора дозы и температур облучения.

ДЕТАЛИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Объект изучения в данной работе - аустенитная нержавеющая сталь 12X18H10T – материал шестигранного чехла бланкетной сборки Н-214(1), длительное время облучавшейся в области рефлектора активной зоны реактора БН-350. Предварительно перед облучением сталь чехла подвергалась стандартной термомеханической обработке (МТО: деформация 15-20%, отжиг при 800°C/ 1 час). Химический состав стали в состоянии поставки приведен в таблице 1.

Образцы для исследований вырезались из чехла сборки Н-214(1) с двух отметок по высоте сборки, отстоящих от центра активной зоны (ц.а.з.) на расстоянии «-375мм», и «+75мм». Выбранным пробам соответствовали различные дозовые и температурные характеристики облучения (таблица 2).

Таблица 1. Химический состав аустенитной стали 12X18H10T (вес.%)

Fe	C	Cr	Ni	Ti	Si	Mn	P	S
основа	0.12	17.00	10.66	0.50	0.34	1.67	0.032	0.013

**ВЛИЯНИЕ ПОСТ-РАДИАЦИОННЫХ ОТЖИГОВ НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СТАЛИ 12Х18Н10Т
– МАТЕРИАЛА ЧЕХЛА ОТРАБОТАННОЙ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ РЕАКТОРА БН-350**

Таблица 2. Изменение параметров облучения по высоте тепловыделяющей сборки Н-214(1) реактора БН-350

Расстояние от ц.а.з., мм	Доза, сна	Скорость набора дозы, 10^{-8} сна/с	Температура облучения, °С
-375	7.3	1.36	294
+75	12.6	2.34	318

Исследования микроструктуры облученной стали проводилась с использованием методики ПЭМ (электронный микроскоп JEM-100СХ при ускоряющем напряжении 100кВ). Для исследований были приготовлены Ø3мм-диски толщиной менее 300мкм, которые также подвергались шлифовке и полировке. Заключительное утонение ПЭМ-объектов проводилось с помощью двухсторонней струйной электрополировки в электролите следующего состава 20%НСlO₄ + 80%С₂Н₅ОН.

С целью изучения характера изменений микроструктуры облученной стали 12Х18Н10Т в результате пост-радиационной термообработки подготовленные образцы подвергались последовательному изохронному отжигу в течение 1 часа при нескольких температурах в интервале от 500 до 1050°С. Отжиг проводился в вакуумной печи СШВЛ-0,62/16. Контроль температуры осуществлялся с помощью хромель-алюмелевой термодпары, вакуум при отжиге ~10⁻⁴мм.рт.ст. Характеризация микроструктуры осуществлялась после каждого этапа термической обработки. Для сравнения одновременно проводили отжиг необлученной стали 12Х18Н10Т в состоянии МТО и исследовали образцы методом ПЭМ.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Как показали детальные ПЭМ-исследования, микроструктура стали сборки Н-214(1) после облучения характеризуется наличием вакансионных пор, петель Франка, карбидных выделений TiC, а также мелких дефектных комплексов типа «black dots». Основные характеристики дефектной структуры представлены в таблице 3.

Отметка «-375мм» (7.3сна). После облучения в стали 12Х18Н10Т наблюдались зерна двух типов с высоким и низким содержанием вакансионных пор и вторичных фаз глобулярной формы (рисунок 1). Возможные причины такого структурного явления подробно обсуждались в работе [11] и могут быть связаны с наличием разно-напряженного состояния в зернах, а также с различием в элементном составе разных зерен. В таблице 3 приведены значения плотности и среднего размера пор и выделений, усредненные по группам зерен для стали на данной отметке. При этом средняя величина вакансионного распухания составляла 0.11%.

После отжига при 500°С в течение 1 часа микроструктура облученной стали претерпела ряд изменений (рисунок 1). Произошел частичный отжиг имевшихся в материале мелких радиационных де-

фектов. Дефекты типа дислокационных петель представляют собой смесь петель Франка с вектором Бюргерса $a/3\langle 111 \rangle$ и призматических петель с вектором Бюргерса $a/2\langle 110 \rangle$, лежащих в плоскостях типа $\{111\}$. При этом доля дефектных петель Франка составляла ~ 60% от полного количества петель. Можно констатировать уменьшение полной концентрации петель после отжига почти в 2.5 раза, а также незначительное сокращение их среднего размера. При этом размерный интервал для петель сдвинулся в сторону дефектов меньшего размера. Наряду с тем в материале наблюдались мелкие вакансионные поры, однородно распределенные в матрице и локализованные в приграничных зонах. Имеющиеся до отжига участки с высоким и низким распуханием обнаружены не были. Плотность пор и средний размер уменьшились после отжига, в результате чего вакансионное распухание сократилось на порядок, до 0.023%. Параметры, характеризующие состояние мелких карбидных выделений, в результате отжига изменились следующим образом: плотность уменьшилась в три раза, а средний размер – вырос более чем в два раза. Кроме того, в стали после отжига появились фрагменты клубковой дислокационной структуры.

В результате отжига при 800°С (1 час) в стали наблюдалось полное исчезновение мелких пор, дислокационных петель, а также протяженных дислокаций. По виду структура образца близка к случаю гомогенизирующего отжига необлученной стали при 1050°С. Отличие заключается в массовом образовании и прогрессирующем росте выделений вторичных фаз, что является признаком интенсивного старения материала под действием температуры. Необходимо отметить различия формы выпавших выделений. Это выделения глобулярной формы, представляющие собой карбиды TiC, и стержневидные частицы, непрозрачные для электронного пучка. Если первые наблюдались в большинстве зерен и преобладают, то вторые были выявлены лишь в отдельных зернах. Последнее обстоятельство может быть связано с локальным различием в элементном составе стали и состоянии вторичных выделений до отжига. Плотность вторичных выделений (без учета формы) составляет $0.2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$, средний размер -160нм.

**ВЛИЯНИЕ ПОСТ-РАДИАЦИОННЫХ ОТЖИГОВ НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СТАЛИ 12Х18Н10Т
– МАТЕРИАЛА ЧЕХЛА ОТРАБОТАННОЙ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ РЕАКТОРА БН-350**

*Таблица 3. Сводные данные по дефектной микроструктуре облученной стали 12Х18Н10Т
- материала чехла бланкетной сборки Н-214(1) реактора БН-350, рассчитанные по ПЭМ- снимкам*

Отметка, состояние стали	Тип дефектов	Размеры, нм	Средний размер, нм	Плотность, $\times 10^{21} \text{ м}^{-3} / \text{S, \%}$
«-375мм» после облучения	Вакансионные поры	10 ÷ 20	12.0	0.9 / 0.11
	Петли Франка	15 ÷ 75	15.0	25.3
	Выделения	15 ÷ 75	17.6	0.7
	Black dots	2 ÷ 4	3.0	8.3
«-375мм» после облучения и отжига при 500°C	Вакансионные поры	5 ÷ 25	8.3	0.8 / 0.02
	Дисл.петли	5 ÷ 60	24.3	10.3
	Выделения	10 ÷ 100	36.7	0.23
	Black dots	2 - 4	3.0	6.4
	Дислокации	Нет		
«-375мм» после облучения и отжига при 800°C	Гелиевые пузырьки	Единичные, с размерами 20 ÷ 40 нм		
	Выделения, глобул.-е стержневидные	50 ÷ 1250 50 ÷ 350	156 163	0.015 0.005
	Дислокации	Нет		
	Вакансионные поры	5 ÷ 20	9.0	6.4 / 0.26
«+75мм» после облучения	Выделения	10 ÷ 20	12.3	0.14
	Петли Франка	5 ÷ 30	10.9	8.7
	Black dots	2 - 4	3.0	20.6
	Вакансионные поры	Нет		
«+75мм» после облучения и отжига при 650°C	Выделения глобул. Выделения прямоуг.	5 ÷ 50 10 ÷ 100	19.6 37.6	2.1 0.5
	Дисл.петли	10 ÷ 50	27.0	0.64
	Black dots	Нет		
	Дислокации	$4 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$		
	Гелиевые пузырьки	10 ÷ 80	10.0	0.02
«+75мм» после облучения и отжига при 1050°C	Выделения	Нет		
	Дислокации	$1.5 \times 10^{12} \text{ м}^{-2}$		

Отметка «+75мм» (12.6 сна). После облучения микроструктура стали на этой отметке характеризуется высоким содержанием вакансионных пор, дефектных петель Франка и мелких дефектных комплексов «black dots» (рисунок 2). Наблюдается также умеренное содержание мелких вторичных выделений, представляющих собой карбиды TiC. Вакансионное распухание в стали достигает значения 0.26%, которое максимально по всей длине сборки.

После проведения отжига при 650°C (1 час) в стали наблюдались следующие изменения микроструктуры: а) практически полный отжиг вакансионных пор; б) множественное образование выделений вторичных фаз; в) наличие в разных зернах остаточных дислокационных петель либо развитой сетки дислокаций; г) формирование множественных двойников отжига в матрице зерен. Необходимо отметить различие в форме выпавших вторичных выделений.

Это большей частью частицы глобулярной и прямоугольной формы, представляющие собой карбонитриды титана Ti(C,N) (ГЦК) с параметром решетки 0.420-0.433нм [12-13]. При этом, если глобулярные частицы наблюдались в большинстве зерен и явно доминировали, то прямоугольные частицы с размерами от 25 до 80 нм наблюдались кучно лишь в некоторых зернах. Вывод о единой природе выделений различной формы был сделан на основе съемки в темном поле в рефлексе вторичной фазы (рисунок 3): одновременно высвечивались выделения овальной и прямоугольной формы. Средняя плотность образовавшихся карбидных выделений (независимо от формы) $\sim 2.6 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$, средний размер - 18.6нм. Содержание дислокаций в зернах изменялось от единичных, с плотностью $< 10^{12} \text{ м}^{-2}$ до сетчатого типа, с плотностью $4 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$.

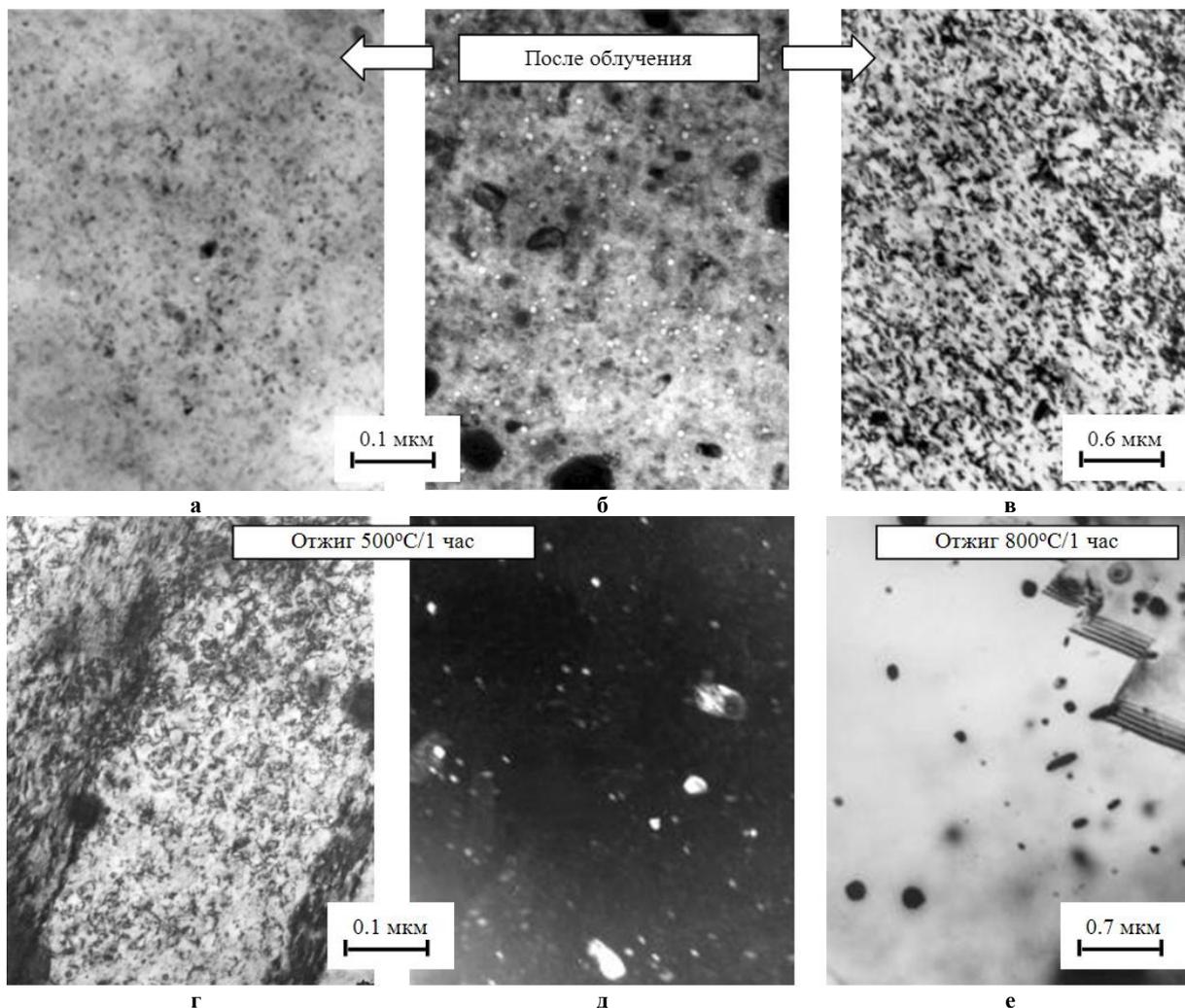


Рисунок 1. ПЭМ-изображения типичной микроструктуры аустенитной стали 12X18Н10Т (МТО), облученной до дозы 7.3 сна (отметка «-375мм» от ц.а.з.) после облучения (а-в) и двух последовательных изохронных отжигов (1 час) при температуре 500°C (г-д) и 800°C (е). а-б) Вакансионные поры и мелкие вторичные выделения в зернах разного типа, в) дислокационные петли; г) петли и вакансионные поры, д-е) вторичные выделения.

После отжига при 1050°C (1 час) в стали наблюдалась микроструктура, характерная для аустенизированного состояния: единичные дислокации плотностью $<10^{12} \text{ м}^{-2}$, отсутствие в матрице и по границам зерен мелких выделения вторичных фаз. Согласно данным металлографии [14] сильно выросшие карбидные частицы размером до 15-20 мкм наблюдаются на некоторых участках структуры (в матрице и на границах отдельных зерен), однако в ПЭМ такие частицы наблюдать невозможно. Кроме того ПЭМ-наблюдение обнаружило единичные гелиевые поры, расположенные в матрице и по границам зерен.

Сравнительный отжиг необлученной стали 12X18Н10Т (МТО) проводился при температурах 450°C, 650°C, 850°C и 1050°C (рисунок 4). ПЭМ-исследования показали, что основной характеристикой микроструктуры до отжига является высокая плотность дислокаций, образующих ячеистую сетчатую микроструктуру. С ростом температуры отжига плотность дислокаций меняется слабо, значительное уменьшение числа дислокаций наблюдается только при температуре 1050°C. После 850°C в необлученной стали наблюдалось образование глобулярных карбидных выделений.

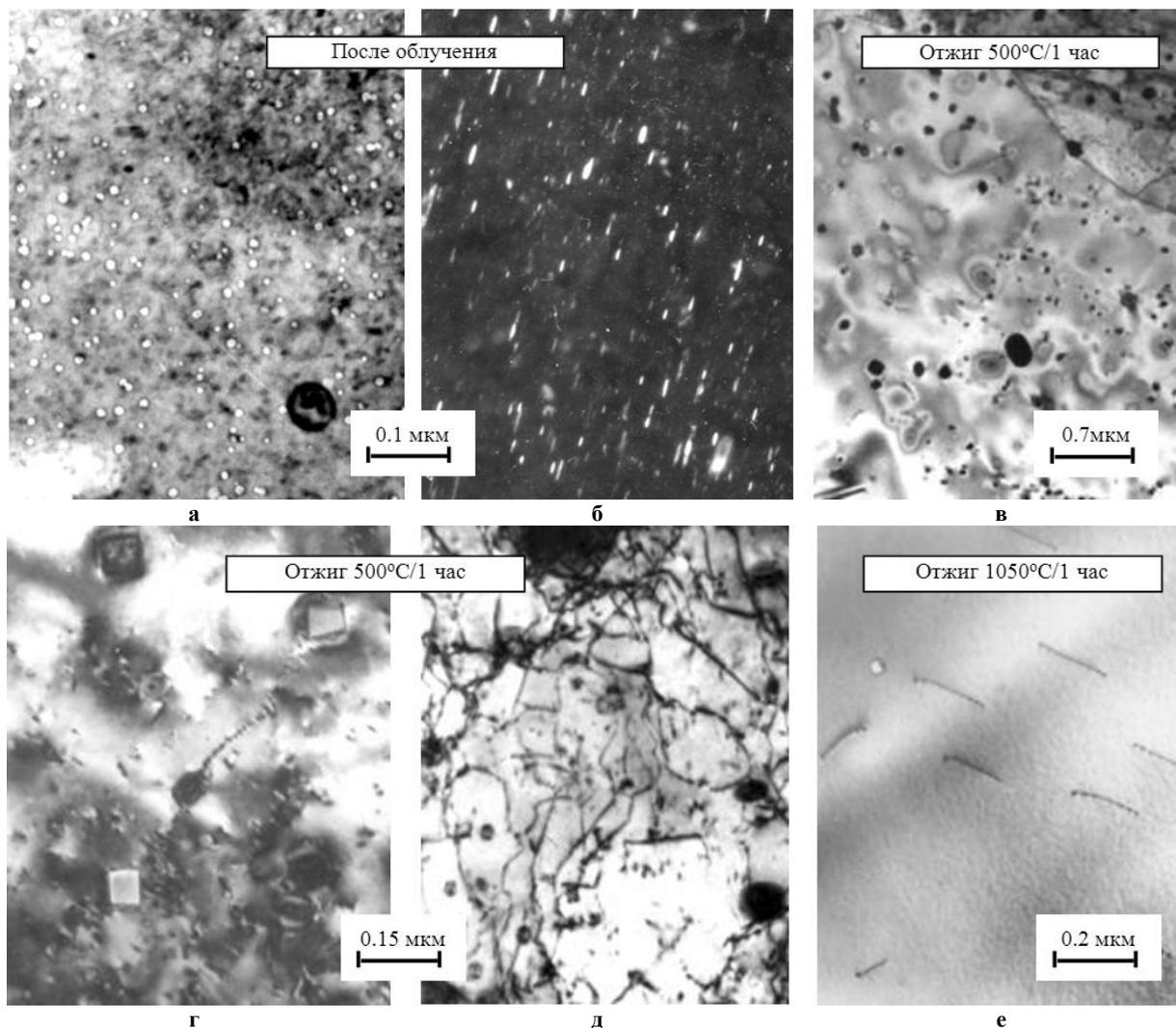


Рисунок 2. ПЭМ-изображения типичной микроструктуры аустенитной стали 12Х18Н10Т, облученной до дозы 12.6 снв (отметка «+75мм» от ц.а.з.) после облучения (а-б) и двух последовательных изохронных отжигов (1 час) при температуре 650°C (в-д) и 1050°C(е). а) Вакансионные поры и мелкие вторичные выделения, б) дислокационные петли и black dots-дефекты; в) вторичные выделения; г) выделения и петли; д) дислокации; е) гелиевые поры и остаточные дислокации

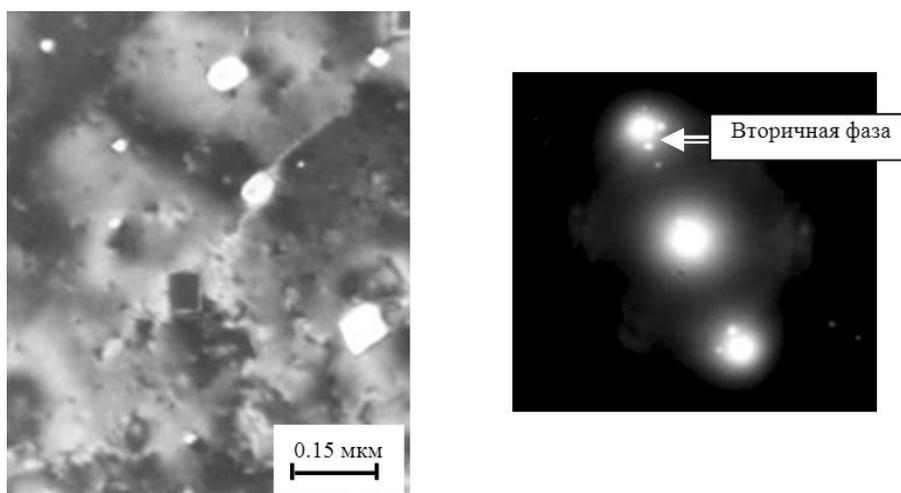


Рисунок 3. Вторичные карбонитриды разной формы в облученной нейтронами стали 12Х18Н10Т после отжига при 650°C. Темное поле в рефлексе вторичной фазы

**ВЛИЯНИЕ ПОСТ-РАДИАЦИОННЫХ ОТЖИГОВ НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СТАЛИ 12Х18Н10Т
– МАТЕРИАЛА ЧЕХЛА ОТРАБОТАННОЙ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ РЕАКТОРА БН-350**

Таблица 4. Изменение плотности дислокаций в необлученной стали 12Х18Н10Т (МТО) в результате отжига

Температура отжига (1 час)	Средняя плотность, м ⁻²	Температура отжига (1 час)	Средняя плотность, м ⁻²
450°С	3.8×10^{14}	850°С	1.15×10^{14}
650°С	3.9×10^{14}	1050°С	$\sim 10^{12} - 10^{13}$

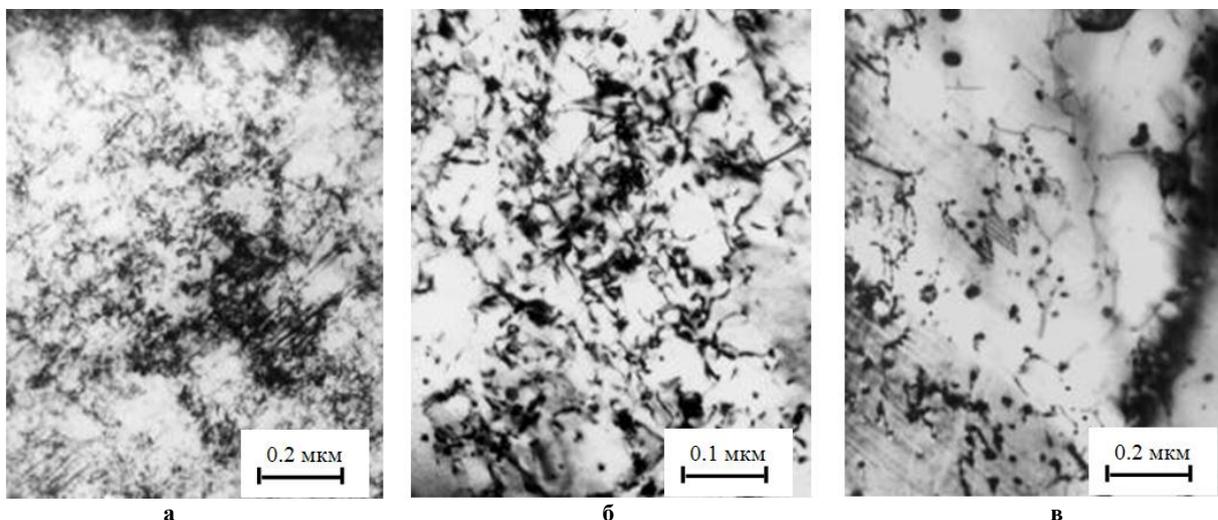


Рисунок 4. Эволюция дислокационных дефектов в необлученной стали 12Х18Н10Т (МТО) после часовых изохронных отжигов при температурах 450°С (а), 650°С (б) и 850°С (в)

ОБСУЖДЕНИЕ

При температурах часового отжига 500-650°С в образцах на обеих отметках по высоте сборки Н-214(1) наблюдалось интенсивное уменьшение вакансионной пористости. На отметке «-375» (облучение 7.3сна при 294°С) имело место уменьшение вакансионного распухания в 5 раз после отжига при 500°С, а на отметке «+75» (облучение 12.6сна при 318°С) после отжига при 650°С наблюдалось полное исчезновение вакансионных пор. Аналогичное явление уменьшения пористости было зафиксировано в исследовании Коуэла и др. [8] для стали 304SS, облучавшейся до доз 10.6 и 12.2сна при температурах 375 и 378°С. Здесь в результате отжига в колонне микроскопа при 500°С в течение 1 часа наблюдали снижение плотности пор в два раза и исчезновение пор крупных размеров. Мелкие дефекты при этом оставались без изменения и было зафиксировано появление пузырьков неограниченной формы. В нашем случае также имел первичный отжиг оградненных пор и увеличение числа мелких неограниченных дефектов. Для объяснения данного факта можно предположить ведущую роль растворенного в материале гелия, являющегося продуктом ядерных реакций при нейтронном облучении. Атомы гелия, находясь в стали, образуют мелкие кластерные комплексы, невидимые в ПЭМ. Последние при пост-радиационном отжиге служат своего рода «ловушками» для мигрирующих вакансий, в результате чего наблюдается некоторый рост числа мелких вакансионных пор. Также возможны процессы поглощения вакансионной порой междоузельных ато-

мов, в результате чего может уменьшиться первоначальный размер пор.

Наряду с вышеизложенным в результате отжига имело место уменьшение плотности дислокационных петель в 2.5 раза и одновременное возрастание среднего размера петель на отметке «-375» после отжига при 500°С. На отметке «+75» после отжига при 650°С петли продолжали наблюдаться только на участках, где не было дислокационной сетки. При этом основной причиной исчезновения петель является отжиг дефекта упаковки петель и превращение их в подвижные полные петли, которые впоследствии создают дислокационные скопления.

На рисунке 5 представлен график изменения гидростатической плотности стали 12Х18Н10Т с отметок «-375» и «+75мм» в зависимости от температуры отжига, полученный в работе [14]. Немонотонный характер изменения плотности стали при отжиге можно связать с изменениями дефектной микроструктуры. К сожалению, при этом объяснения будут носить лишь предположительный характер из-за отсутствия отжигов ПЭМ-объектов с шагом 100°С. На отметке «+75мм» после отжига при 500°С наблюдается промежуточный минимум по плотности, который можно было бы объяснить, в основном, развитием вакансионной пористости: а именно, за счет роста средних размеров вакансионных пор. Так как концентрация пор после облучения здесь на порядок превышала концентрацию пор на отметке «-375» было бы, по-видимому, маловероятно ожидать появления новых пузырьков после отжига. (Заметим, что высокая однородная пористость при относительно небольшом среднем размере на отметке «+75» по сравнению с «-375» может

свидетельствовать о более высоком содержании наработанного гелия в стали.) Более вероятным развитием ситуации был бы рост размеров пор за счет коалесценции нескольких соседних мелких дефектов. После отжига при температуре 700°C наблюдали практически полное восстановление величины плотности. Так как здесь в стали пор уже не наблюдается (они не обнаружены методом ПЭМ после отжига при 650°C), то небольшое расхождение с плотностью необлученного материала можно объяснить высоким содержанием карбидных фаз, плотность которых меньше плотности матрицы. Дальнейшее уменьшение плотности с повышением температуры отжига можно объяснить перерастворением карбидных выделений в матрице (обогатением матрицы углеродом и пр. примесями внедрения) и отжигом механических уплотнений структуры типа двойников деформации, дефектов упаковки, междоузельных петель, дислокационных скоплений. В результате вышесказанного параметр решетки аустенита будет увеличиваться. Увеличение параметра решетки аустенитной стали, отвечающее величине максимального изменения плотности, составляет ~0.2%.

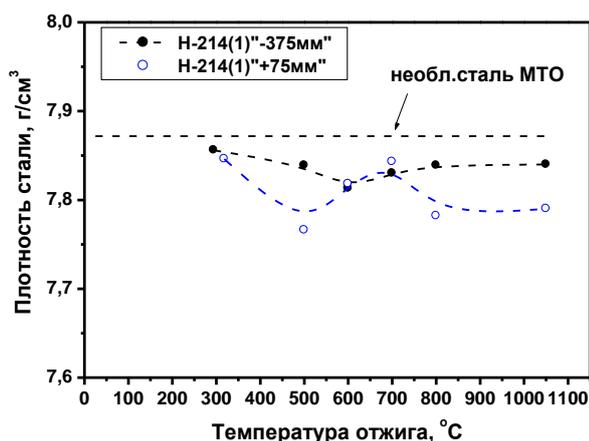


Рисунок 5. Изменение плотности облученной нейтронами и необлученной (после МТО) стали 12Х18Н10Т с ростом температуры изохронного отжига. По данным работы [14]

Кривые отжига радиационного упрочнения стали с отметок «-375мм» и «+75мм» сборки Н-214(1) в сравнении с отжигом механического упрочнения стали после МТО в интервале температур 500-1050°C [14] представлены на рисунке 6. Видно, что после часового отжига при 1050°C величины H_v облученных проб и необлученного материала почти совпадают. Отжиг ΔH_v для стали с двух отметок при температурах ниже 700°C идет почти с одинаковой скоростью. Тогда как при 700°C ΔH_v стали с отметки «-375мм» начинает уменьшаться интенсивнее и уже при температуре отжига 800°C достигает H_v аустенизированного состояния. По результатам ПЭМ после отжига при 800°C в стали наблюдалась высокая

плотность мелких вторичных карбонитридных частиц. Сильное уменьшение ΔH_v показывает, что данные вторичные выделения слабо упрочняют матрицу, по-видимому, вследствие того, что она, в свою очередь, обедняется атомами титана и углерода и становится более «мягкой». Последнее предположение подтверждается ранее проведенными исследованиями влияния изохронного отжига на прочностные свойства стали Х18Н9Т, облученной до 5 сна в исследовательском реакторе ВВР-К [9]. В этом случае отжиг при температуре 750°C привел к выделению $1 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ частиц TiC со средним размером 16.3 нм и плотностью $1 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$, однако заметного упрочнения матрицы не произошло.

Сталь с отметки «+75мм» после отжига при 700°C показывает замедление уменьшения ΔH_v . Согласно ПЭМ - наблюдениям в данной работе, после отжига при 650°C в материале образовалось большое количество промежуточных карбонитридов, сопровождаемых остаточными дислокационными петлями и возникшей сеткой дислокаций. Из замедления уменьшения ΔH_v с ростом температуры изохронного отжига следует, что данная дефектная структура сильнее упрочняет матрицу. После отжига при 1050°C мелкие карбонитриды полностью переходят в твердый раствор.

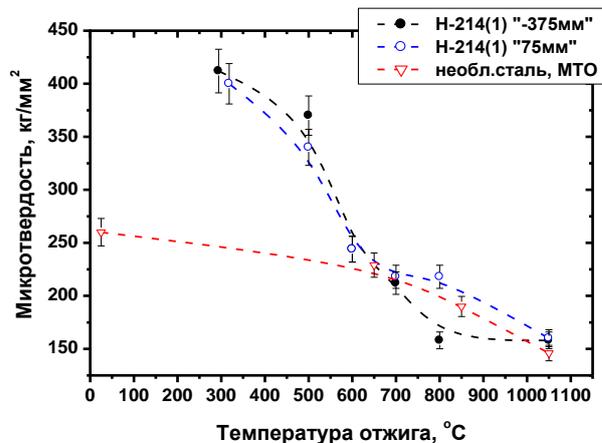


Рисунок 6. Изменение микротвердости облученной нейтронами и необлученной (после МТО) стали 12Х18Н10Т с ростом температуры изохронного отжига. По данным работы [14]

Корреляционное соотношение между приростом предела текучести облученной стали и изменением микротвердости получено на основе анализа большого числа данных для сталей, облученных в реакторах разного типа [15-16]. Изменится ли оно в случае применения к облученному материалу дополнительной пост-радиационной обработки (отжига или деформации) или нет – вопрос, который требует дополнительных исследований. Предположим, что для сталей со сравнительно низкими значениями повреждающих доз и температур облуче-

ния, корреляционное отношение при пост-радиационной обработке меняется незначительно. Тогда, используя известную модель дисперсных барьеров [3], можно попытаться описать интенсивность отжига радиационного упрочнения на основе данных по плотностям и размерам радиационных дефектов, полученных в ПЭМ. В настоящей работе при расчете использовали корреляционное соотношение, полученное для аустенитных сталей в работе Басби [15] (2005г.) $\Delta\sigma = 3.03 \cdot \Delta H_v$. Согласно модели «дисперсных барьеров», полное изменение предела текучести можно представить в виде суммы

$$\Delta\sigma_{tot} = \Delta\sigma_{LR} + \sqrt{\sum_i (\Delta\sigma_{SR,i})^2},$$

где $\Delta\sigma_{LR} = M\alpha\mu b\sqrt{\rho_d}$ - это вклад от дислокаций, $\Delta\sigma_{SR,i} = M\alpha\mu b\sqrt{Nd}$ - вклад от локального «барьера» i-го сорта. Здесь $M = 3.06$; α - мера мощности барьера; $b = 2.5 \times 10^{-10}$ м; модуль сдвига для сталей типа Х18Н10 $\mu = 84$ ГПа [16]; N и d , соответственно, значения плотности и среднего размера дефектов, ρ_d - плотность дислокаций.

Расчет показал, что наилучшее соответствие с экспериментальными данными получается при использовании следующих коэффициентов упрочнения: 1 - для вакансионных пор и гелиевых пузырьков, 0.33 - для дефектных петель Франка и мелких карбидных выделений, 0.2 - для мелких дефектных комплексов типа «black dots» и дислокаций. Отметим, что такие же коэффициенты упрочнения в случае проб с пяти отметок по высоте сборки Н-214(1) дали удовлетворительное согласие ПЭМ- оценки радиационного прироста ΔH_v с экспериментом. Оказалось принципиально важным учитывать количественный уровень предварительного упрочнения материала чехла до облучения и его уменьшение при часовом изохронном отжиге при разных температурах. Тогда выражение для радиационного индуцированного прироста микротвердости будет иметь вид

$$\Delta H_v(T_{an}) = H_v(T_{an}) - H_0(T_{an}),$$

где $H_v(T_{an})$ микротвердость после облучения и пост-радиационного отжига, а $H_0(T_{an})$ - микротвердость необлученного чехла (МТО) после аналогичного отжига. Если микротвердость облученной стали и необлученного аналога в процессе отжига сравниваются, то в качестве $H_0(T_{an})$ удобно взять микротвердость аустенизированного состояния $H_0(1050^\circ C)$. Согласно работе [14], микротвердость стали 12X18H10T до облучения (МТО) составляет ~ 260 кг/мм², что близко к результатам измерения H_v материала чехла в середине грани до облучения [17].

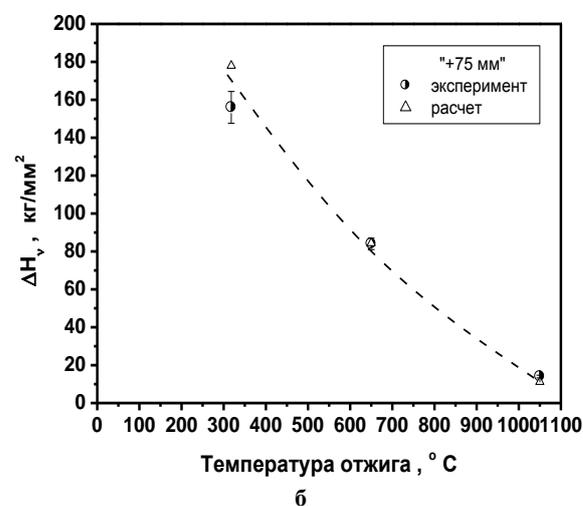
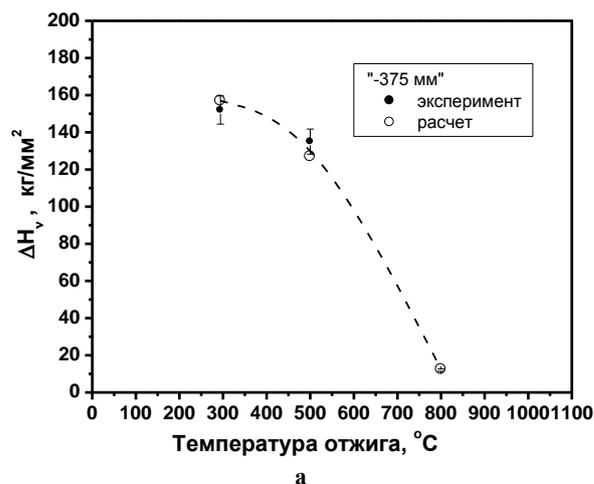


Рисунок 7. Изменение микротвердости облученной нейтронами стали 12X18H10T на разных отметках от ц.а.з. сборки Н-214(1) реактора БН-350. Расчет выполнен по результатам ПЭМ-исследований стали

Результаты расчета ΔH_v стали в рамках модели дисперсных барьеров на обеих отметках сборки Н-214(1) в сравнении с экспериментальными данными приведены на рисунке 7. С едиными коэффициентами упрочнения разного типа дефектов α_i получено удовлетворительное соответствие расчета с экспериментальными данными. Необходимо отметить, что те же коэффициенты α_i удовлетворяют описанию радиационного упрочнения в стали сборки Н-214(1) после облучения на разных отметках [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ПЭМ-исследованиями показано, что характер изменения тонкой микроструктуры и прочностных свойств (микротвердость) облученной стали 12X18H10T в результате часовых пост-радиационных отжигов зависит от степени радиационно-индуцированной деградации материала (т.е. от величин повреждающей дозы, температуры облучения и скорости набора дозы). До отжига микроструктура

облученной стали с обеих отметок «-375» и «+75» по высоте сборки Н-214(1) характеризовалась наличием дефектов типа вакансионных пор, петель Франка, вторичных карбидных выделений и мелких дефектных комплексов black dots. При средних температурах отжига 500°C (для отметки «-375») и 650°C (для отметки «+75») имело место интенсивное уменьшение вакансионной пористости, а также существенное сокращение плотности дефектных дислокационных петель и мелких дефектов. Содержание вторичных выделений меняется разнонаправлено: на отметке «-375» после отжига при 500°C – их плотность уменьшается, а средний размер растет; на отметке «+75» после отжига при 650°C – плотность выделений резко возрастает с одновременным ростом средних размеров. Возможно, такое поведение выделений связано с более высокой температурой отжига для образца с отметки «+75» (для стали с отметки «-375» отжиг при 650°C не проводился). Однако, данные по изменению микротвердости металлографических образцов, измеренные после отжигов при температурах 500-800°C с шагом 100°C, ясно показывает, что на отметке «-375» происходило монотонное уменьшение микротвердости, тогда как на отметке «+75» при температурах выше 650-700°C отжиг микротвердости замедлялся, что может быть обусловлено образованием множественных карбидных выделений, которые вносят небольшое дополнительное упрочнение в аустенитную матрицу. Отсутствие подобной «ступеньки» на графике отжига микротвердости стали с отметки «-375» косвенно свидетельствует об отсутствии в данной стали множественных выделений в данном температурном интервале.

ЛИТЕРАТУРА

1. Garner, F.A. The microstructural origins of yield strength changes in AISI 316 during fission or fusion irradiation / F.A. Garner, M.L.Hamilton, N.F.Panayotov, G.D.Johnson // Journal of Nucl. Mater. - 1981. - V. 103-104. - P. 803-808.
2. Allen, T.R. Analyzing the effect of displacement rate on radiation-induced segregation in 304 and 316 stainless steels by examining irradiated EBR-II components and samples irradiated with protons/ T.R.Allen, J.I.Cole, E.A.Kenik, G.S.Was // Journal of Nucl. Mater.- 2008.-V.376.-N2. –P.169-173.
3. Lucas, G.E. The evolution of mechanical property change in irradiated austenitic steels / G.E.Lucas // Journal of Nucl. Mater. - 1993.- V. 206.- P.287.-305.
4. Porter, D.L. Response to annealing and reirradiation of AISI 304L stainless steel following initial high-dose neutron irradiation in EBR-II/ D.L. Porter, G.L.McVay, L.C.Walters // In: Proc. of 10th Intern. Symp. on Effects of Radiation on Materials ASTM STP 725, ASTM, Savannah, GA, 1980, p. 500-511.
5. Robertson, C. Influence of post-irradiation thermal annealing on the mechanical properties of ion irradiated layers in 316L stainless steel / C.Robertson, L.Boulanger, S.Poissonnet // Journal of Nucl. Mater.-V.271-272. -P.102-105.
6. Ishiyama, Y. Post-irradiation annealing effects on microstructure and helium bubbles in neutron irradiated type 304 stainless steel / Y.Ishiyama, M.Kodama, N.Yokota, K.Asano, T.Kato, K.Fukuya // Journal of Nucl. Mater. - V. 239.- N 1.- 1996. - P.90-94.
7. Nikolaeva, A.V. Restoration of Mechanical Properties of Irradiated Steel by Thermal Annealing / A.V.Nikolaeva, Yu.A.Nikolaev, Yu.R.Kevorkyan // Atomic Energy.-2001.-V. 90. -N 6. -P.475-479.
8. Cole, J.I. Microstructural changes induced by post-irradiation annealing of neutron-irradiated austenitic stainless steels / J.I.Cole, T.R. Allen // Journal of Nucl. Mater. -2000. - V.329-333. - P.283-287.
9. Цай, К.В. Эволюция выделений вторичных фаз при отжиге аустенитной стали 12X18H9T, облученной нейтронами до 5 сна / К.В.Цай, О.П.Максимкин, Л.Г.Турубарова // ФММ.- 2007. -Т.103. -№3. - С.294-302.
10. Цай, К.В. Влияние облучения и пост-радиационной термообработки на микроструктуру и свойства стали 12X18H9T, облученной в исследовательском реакторе ВВР-К до 5 сна / К.В.Цай, О.П.Максимкин, Л.Г.Турубарова //Вопросы атомной науки и техники. Сер.Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение.-2008.- Т.92. - №2. -С.100-107

Исследования показали, что восстановление микроструктуры и свойств (т.е. микротвердости) до уровня материала до облучения (МТО) происходит уже на границе области средних температур, т.е. при температурах часового отжига $T_{an} = 650-700^\circ\text{C}$. Температуру 650°C, отжиг при которой дает близкие по величине значения микротвердости для облученной стали с малыми сна и необлученной стали в состоянии МТО, можно условно считать температурой отжига радиационного упрочнения стали с малыми сна. Заметим, однако, что это справедливо только при условии, что при отжиг не нарушает корреляционное соотношение между ΔH_v и $\Delta \sigma_{0,2}$, и можно воспользоваться выводами модели упрочняющих «дисперсных барьеров».

В работе предпринята попытка рассчитать радиационное упрочнение стали в рамках модели дисперсных барьеров, используя полученные из ПЭМ-исследований параметры радиационных дефектов. Показано, что использование известного корреляционного соотношения [15] и набора параметров α_i – мер прочности барьеров для радиационных дефектов (1 – для вакансионных пор, 0,33 – для дефектных петель и выделений, 0,2 – для black dots-дефектов и дислокаций) дает хорошее согласие с экспериментальными данными по уменьшению прироста микротвердости как для облученной стали без отжига, так и после проведения нескольких пост-радиационных изохронных отжигов. Однако такое совпадение может иметь достаточно локальную применимость только к материалам с небольшим радиационным повреждением.

11. Цай, К.В. Микроструктурные исследования стали 12Х18Н10Т, облучавшейся нейтронами в области рефлектора реактора БН-350 / К.В. Цай // Вестник НЯЦ. -2008.-№4. - С. ____.
12. Sourmail, T. Literature Review. Precipitation in creep resistant austenitic stainless steels / T.Sourmail // Materials Science and Technology.- 2001. -V.17. -N1. - P.1-14.
13. Иванов, Л.И. Радиационная физика металлов и ее приложения / Л.И.Иванов, Ю.М. Платов. - М.: Интерконтакт, Наука. - 2002.- 300с.
14. Максимкин, О.П. Изменение микроструктуры и свойств облученной нейтронами аустенитной стали 12Х18Н10Т в результате пост-радиационного отжига / О.П.Максимкин, К.В.Цай, Л.Г.Турубарова, Н.С.Сильнягина, Т.А.Доронина // Вестник НЯЦ.- 2008.-№4.-С.
15. Busby, J.T. The relationship between hardness and yield stress in irradiated austenitic and ferritic steels / J.T.Busby, M.C.Hash, G.S.Was // Journal of Nucl. Mater. - 2005. - V. 336. - P.267-278.
16. Неустроев, В.С. Эволюция микроструктуры стали типа Х18Н10Т при низкотемпературном облучении нейтронами как основной фактор упрочнения / В.С.Неустроев, З.Е.Островский, С.В.Белозеров // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2007. - №6. - С.78-81.
17. Максимкин, О.П. Анализ результатов и новая концепция исследования материалов тепловыделяющих сборок реактора БН-350 / О.П.Максимкин. // Сборник материалов международной конференции «Ядерная и радиационная физика», (26-29 сентября 2005г.), Алматы, 2006, т.1, с.98-134.

**«БН-350 РЕАКТОРЫНЫҢ ПАЙДАЛАНЫП ШЫҒАРЫЛҒАН ЖЫЛУШЫҒАРУШЫ ЖИНАМАСЫ
ҚАБЫНЫҢ МАТЕРИАЛЫНЫҢ - 12Х18Н10Т БОЛАТТЫҢ МИКРОҚҰРЫЛЫМЫ МЕН
ҚАСИЕТТЕРІНЕ РАДИАЦИЯДАН КЕЙІНГІ КҮЙДІРУДІҢ ЫҚПАЛЫ»**

Цай К.В.

ҚР ҰАО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

БН-350 реакторы активті аймағының рефлекторы тұсында 318°С аспайтын температуралар кезінде 7.3 және 12.6 аж зақымдыушы дозаларға дейін сәулелендірілген, 12Х18Н10Т болаттың микроқұрылымы мен қасиеттеріне радиациядан кейінгі күйдірудің ықпалы қарастырылады. Күйдірулер 500-1050°С температура аралығында 1 сағат бойы, содан кейін нәзік құрылымның күйін сипаттай отырып, жарық өткізуші электрондық микроскопия әдісі арқылы жүргізілді. Алынған микроқұрылымдық деректер сәулелендірілген 12Х18Н10Т болаттың жылумен өндеудің нәтижесінде микроқаттылығы мен тығыздығының өзгерістерін түсіндіру үшін пайдаланылады.

**INFLUENCE OF POST-IRRADIATION ANNEALINGS ON BOTH MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES
OF 12CR18-NI10TI STEEL – MATERIAL OF SPENT ASSEMBLY SHROUD OF THE BN-350 REACTOR**

K.V. Tsay

Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty, Kazakhstan

The effect of post-irradiation annealings on both microstructure and properties of 12Cr18-Ni10Ti steel irradiated in the reflector area of the BN-350 reactor core to damage doses of 7.3 and 12.6 dpa at temperatures limited to 318°С is examined. 1hour-annealings were carried out over temperature range 500-1050°С with subsequent characterization of fine structure condition of steel with using the transmission electron microscopy. Microstructural data obtained are used for explanation of changes in both microhardness and immersion density of irradiated 12Cr18-Ni10Ti steel after thermal treatment.

УДК 539.26; 539.219.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕНТГЕНОДИФРАКТОМЕТРИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ПРИ ДИФфуЗИОННОМ ФАЗООБРАЗОВАНИИ В СИСТЕМЕ Ве – Тi

Антонюк В.И., Поляков А.Н., Поддубная Е.В., Слюсарев А.П., Иманбеков Ж.Ж., Жанкадамова А.М.

Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан

Исследования диффузии бериллия в титан и фазово-структурные превращения в слоистой системе Ве-Тi на образцах титановой фольги с одно и двухсторонним Ве – покрытием выявили некоторые особенности в рентгенодифрактометрических спектрах при формировании бериллидов ВеТi и Ве₂Тi.

Установлены ориентационные эффекты образования Ве – слоя при магнетронном методе нанесения покрытия. Дифракционный рефлекс Ве (002) регистрируется только при малоугловом методе записи дифрактограмм (Grazing Incidence - GR). Изохронный отжиг образцов Тi – фольги со слоем бериллия при Т = 500°С в течение 2ч приводит к синтезу бериллида ВеТi, отсутствующего на фазовой диаграмме системы Ве-Тi, построенной для кристаллизации расплавов.

Вычислены параметры кристаллической ячейки титана по дифрактограммам записанным в режиме фокусировки по Бреггу-Брентано (Б-Б) и (GR) от двух сторон образца после каждого этапа изохронного отжига. Выявлены особенности диффузии Ве в Тi – фольгу и фазообразования в односторонней и двухсторонней слоистой системе Ве-Тi в зависимости от режима и суммарной длительности отжига.

Теоретические расчеты показали, что при диффузии Ве в Тi при Т = 500°С в приповерхностной зоне титана образуются слоистые структуры с различным содержанием фаз по глубине образца, соответствующие полученным экспериментальным данным.

ВВЕДЕНИЕ

Модификация физических свойств поверхности после нанесения на подложки тонкослойных покрытий методом магнетронного напыления на ионно-плазменной установке является одним из приоритетных направлений научных исследований по разработке современных технологий создания новых материалов и сплавов с заданными свойствами [1, 2].

Нами исследованы процессы диффузионного фазообразования в слоистых образцах системы Ве – Тi, полученных на ионно-плазменной установке «Аргмак» ИЯФ НЯЦ РК [2]. Для установления температуры кристаллизации бериллида ВеТi и области его устойчивости вначале были проведены высоковакуумные изохронные отжики образцов Тi – фольги толщиной 4,4 мкм с односторонним Ве – покрытием различной толщины (1,01, 0,78, 0,59 и 0,42 мкм) после магнетронного нанесения слоев. Образцы отжигались при температурах 300, 500 и 700°С в течение 2ч. После записи дифрактограмм двух сторон образцов с регистрацией дифракционной картины раздельно от объема (Б-Б) и поверхности (GR) установлена температура образования бериллида ВеТi и особенности перекристаллизации при этом титановой подложки.

Затем проводились экспериментальные исследования распределения Ве в процессе термической диффузии и фазовые превращения при последовательном изотермическом высоковакуумном отжиге в слоистой системе Ве – Тi на образцах титановой фольги толщиной от 8 до 50 мкм с односторонними и двусторонними Ве – покрытиями разной толщины. Образцы титановой фольги толщиной 8 и 10 мкм были получены методом холодного проката Тi

– ленты толщиной 28 мкм и после рекристаллизационного отжига использовались для приготовления тонкослойных образцов с односторонним Ве – покрытием толщиной 2 мкм. Промышленная Тi – лента толщиной 45 и 50 мкм использовалась в качестве подложек для изготовления образцов с двухсторонними слоями Ве толщиной 1,3 и 2 мкм.

Перед напылением бериллия образцы подвергались ионно-плазменной чистке в плазме тлеющего разряда и осаждение бериллиевых покрытий производилось на атомарно-чистую поверхность. Контроль толщины осажденных слоев осуществлялся весовым методом.

В процессе изотермических отжигов после каждого этапа отжига контролировалось образование бериллидов титана, растворение бериллия в титане, изменение параметров кристаллической решетки титана и перекристаллизация его структуры. Такой комплексный подход при рентгенодифрактометрическом изучении диффузии и фазовых превращений в слоистой системе бериллий – титан в процессе термических отжигов позволяет контролировать исходное структурное состояние материала Тi – подложки после прокатки фольги, особенности перекристаллизации титана на двух сторонах в процессе отжига, отслеживать изменение положения, интенсивности и формы дифракционных отражений, связанное с диффузией бериллия.

Последовательные изотермические отжиги проводились в высокотемпературной вакуумной камере (вакуум не более 3×10^{-6} Тор) при температуре 500°С по двум режимам:

1. Диффузионные отжики образцов Тi – фольги толщиной 8 мкм с односторонним Ве покрытием и

образцов на Ti – подложке толщиной 45 мкм с двухсторонним слоем Be толщиной 1,3 и 2 мкм соответственно без «закалки»: циклический изотермический отжиг длительностью от 0,5 до 75 ч с медленным остыванием образца в печи совместно с высоковакуумной камерой после каждого этапа отжига.

2. Диффузионные отжики образцов Ti – фольги толщиной 10 мкм с односторонним Be покрытием и на Ti – подложке толщиной 50 мкм с двухсторонним слоем Be толщиной 1,3 и 2 мкм соответственно с «закалкой»: циклический изотермический отжиг длительностью от 0,5 до 75 ч с быстрым остыванием образца в высоковакуумной камере после удаления печи на каждом этапе отжига.

Рентгенодифрактометрические исследования выполнялись на автоматическом дифрактометре D8 Advance Bruker AXS с цифровой записью результатов измерения. Съемка проводилась в геометрии расходящегося рентгеновского пучка с фокусировкой по Брэггу-Брентано (Б-Б) и в геометрии параллельного рентгеновского луча при скользящем облучении поверхности образца рентгеновским пучком с малым углом падения (GR). Это позволило получить информацию отдельно о структурно-фазовом составе в объеме вещества до глубины 3-4 мкм и в поверхностном слое толщиной около 1 мкм. Применение малых углов падения (от 0,1 до 3°) рентгеновского пучка приводит к существенному уменьшению глубины проникновения рентгеновских лучей и увеличению площади зоны облучения. При облучении поверхности образца под малым углом φ (GR) основная часть первичного рентгеновского пучка поглощается в приповерхностном слое толщиной x :

$$J_1 = J_0 * e^{-\mu x / \sin \varphi},$$

где J_0 – интенсивность падающего пучка, $\mu = \mu^* \cdot \rho$ – линейный коэффициент поглощения материала с плотностью ρ , μ^* – массовый коэффициент поглощения.

Максимальная толщина слоя $x(m)$, для которого $J_1 = 0,01J_0$, равна:

$$x(m) = 4,61 \cdot \sin \varphi / \mu^* \cdot \rho$$

При ослаблении первичного пучка в e – раз используется 63,2 % интенсивности падающего пучка и глубина проникновения $x(e)$ равна:

$$x(e) = \sin \varphi / \mu^* \cdot \rho$$

Поскольку угол скольжения $\varphi \ll \theta$, дополнительным ослаблением интенсивности дифрагированного пучка можно пренебречь.

При рентгенодифрактометрическом исследовании диффузионного фазообразования в процессе последовательного изотермического высоковакуумного отжига регистрировались рефлексы титана 100, 002, 101, 102, 103, рефлекс бериллия Be(002), рефлексы бериллидов BeTi(100), (110) и Be₂Ti (111),

(220). По положению рефлексов вычислялись параметры кристаллической ячейки титана в поверхностном слое $x(e)$ (Б-Б) и на поверхности (GR). Интегральные площади рефлексов Be(002), бериллидов BeTi(100), (110) и Be₂Ti (111), (220) характеризовали изменение содержания этих фаз при увеличении времени отжига. Значения полной ширины на половине максимума рефлекса (FWHM) использовались для контроля перекристаллизации титана на последовательных этапах отжига.

Модификация физических свойств поверхности связана со структурно-фазовыми изменениями в приповерхностном слое подложки, толщина которого соизмерима с глубиной проникновения рентгеновских лучей при записи дифрактограмм. Ввиду неоднородности фазового состава по глубине этого слоя дифракционные эффекты, регистрируемые на различных углах дифракции, характеризуют структурное состояние в соответствующем объеме вещества. Негомогенность фазового состава по глубине и текстурированность новообразованных кристаллитов интерметаллических фаз искажает соотношение интенсивностей дифракционных максимумов, что учитывалось при интерпретации экспериментальных результатов.

ЭКСПЕРИМЕНТ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изохронные отжики

Дифрактометрический анализ тонкослойного покрытия до начала термической обработки показал низкую степень окристаллизованности материала Be – пленки. На дифрактограмме исходных образцов, несмотря на значительную толщину покрытия (до 1 мкм), отсутствуют заметные рефлексы металлического Be и дифракционные отражения проявляются только на уровне флуктуаций фонового излучения. Следовательно, трехмерная кристаллическая структура Be при ионно-плазменном формировании тонкого поверхностного Be-слоя не образуется, или размеры кристаллитов слишком малы. Толщина Ti – фольги составляла 4,4 мкм, что меньше вычисленных значений максимальной глубины проникновения рентгеновского луча $x(m)$. После регистрации рентгеновских спектров в двух режимах: (Б-Б) и (GR), дифрактограммы обрабатывались для определения комплекса дифрактометрических характеристик образцов [3-5]. Определение полной ширины рефлекса на половине максимума (FWHM), размеров блоков когерентного рассеяния и микроискажений решетки, вычисленных для объемной и поверхностной характеристики, показывают различие структурного состояния поверхности и объема образцов Ti – фольги. Материал Ti – фольги в исходном состоянии обладал низким совершенством кристаллического строения. Это подтверждается малыми значениями размеров блоков когерентного рассеяния L (180-200 Å) и значительными микроискажениями решетки ε (0,0040 –

0,0050) как в объеме, так и на поверхности исходной фольги и образцов с Be – покрытием.

Изохронный отжиг образцов Ti – фольги со слоем бериллия при температуре 300°C не изменяет фазового состава и структурного состояния образцов. Отжиг образцов Ti – фольги с бериллиевыми покрытиями различной толщины при температуре 500°C, 2ч приводит к синтезу бериллида BeTi. После изохронного отжига образцов Ti – фольги со слоем бериллия при температуре 500°C происходит модификация структуры со стороны покрытия (рисунок 1). Размер блоков L достигает 1200 Å, микроискажениями решетки ε снижаются до 0,0007. Различие объемной (Б-Б) и поверхностной (GR) характеристик структурного состояния образцов Ti – фольги со стороны Be – слоя при этом намного меньше, чем у образца Ti – фольги без Be – покрытия. Перекристаллизация титана в процессе диффузионных отжигов вызывает некоторые дифракционные эффекты, проявляющиеся как нарушение симметрии дифракционного профиля 002. Наблюдается диффузионное фазообразование бериллида BeTi, отсутствующего на фазовой диаграмме кристаллизации расплава системы Be – Ti [6-8]. Фазообразование BeTi контролируется диффузионными процессами и масса проникающего в Ti – фольгу бериллия зависит только от продолжительности отжига, причем, даже в образце с минимальной толщиной слоя Be 0,42 мкм содержание образующегося бериллида сравнимо с другими образцами (рисунок 2).

Вычислены параметры кристаллической ячейки титана по дифрактограммам, записанным в режиме (Б-Б) и (GR) от двух сторон образца после каждого этапа изохронного отжига и выявлены характерные зависимости. Полученные значения параметра a_0 гексагональной решетки титана изменяются в пределах 0,2955-0,2950 нм (объем) и 0,2949-0,2945 нм (поверхность) для исходного образца со стороны с Be – покрытием толщиной 1,01 мкм и после изохронных отжигов при температурах 300°C и 500°C. Аналогичное уменьшение параметра a_0 титана наблюдается и со стороны Ti – подложки. Значения параметра c_0 гексагональной решетки титана изменяются при этом в пределах 0,4679-0,4687 нм (объем) и 0,4680-0,4682 нм (поверхность) для стороны с Be – покрытием толщиной 1,01 мкм и 0,4684-0,4688 нм (объем), 0,4681-0,4686 нм (поверхность) для стороны без покрытия. Установлена тенденция незначительного снижения параметра c_0 титана в объеме образца при записи дифрактограммы (Б-Б) со стороны Be – слоя после отжига при 300°C и 500°C по мере уменьшения толщины бериллиевого покрытия.

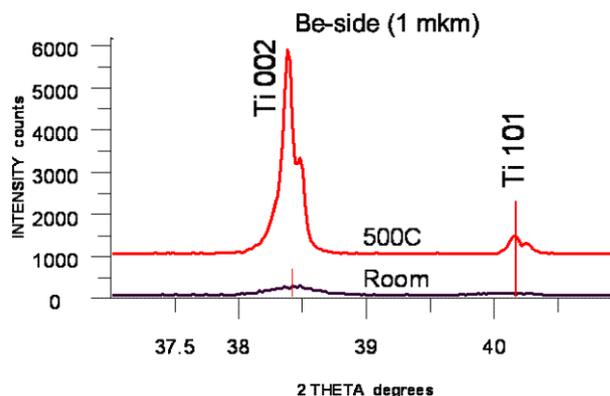


Рисунок 1. Сравнение формы дифракционных рефлексов Ti 002 и Ti 101 образца Ti(4,4 мкм)+Be(1,01 мкм) до и после изохронного отжига при 500°C 2ч (Be – сторона)

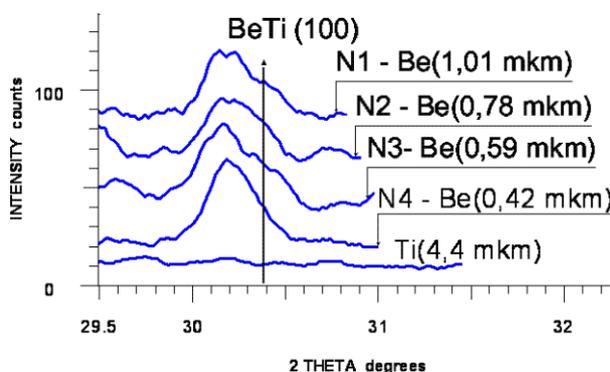


Рисунок 2. Формирование бериллида BeTi на образцах Ti – фольги толщиной 4,4 мкм с бериллиевыми покрытиями различной толщины при температуре 500°C, 2ч: № 1- Be (1,01 мкм); № 2- Be (0,78 мкм); № 3- Be (0,59 мкм); № 4- Be (0,42 мкм).

Наблюдаемая вариация измеренных параметров кристаллической решетки титана, вероятно, связана с присутствием в анализируемом объеме зерен кристаллов твердого раствора Be в Ti с различным содержанием бериллия и бериллида титана, распределенных неравномерно по глубине образца. В таблице 1 приведены размеры блоков когерентного рассеяния и микроискажения решетки образцов Ti – фольги толщиной 4,4 мкм с односторонним Be – слоем.

Результаты определения FWHM при съемке дифракционной картины по (GR) показывают, что уширение дифракционных рефлексов титана после отжига при температуре 500°C наблюдается у образцов Ti с Be – покрытием, но только с обратной стороны подложки, как и на образце Ti – фольги без покрытия. Со стороны Be – слоя уширение дифракционных рефлексов титана после отжига при температуре 500°C не наблюдается и форма отражений для объемной (Б-Б) и поверхностной (GR) характеристик аналогична.

Таблица 1. Размеры блоков когерентного рассеяния и микроискажения решетки образцов Ti – фольги толщиной 4,4 мкм с односторонним Be – слоем

№ обр.	T, °C	геометрия Брэгга-Брентано (Б-Б)				Grazing Incidence (GR)			
		002		101		002		101	
		L, Å	$\epsilon \times 10^{-4}$	L, Å	$\epsilon \times 10^{-4}$	L, Å	$\epsilon \times 10^{-4}$	L, Å	$\epsilon \times 10^{-4}$
№ 1 (Be-s)	20	198	44	130	30	211	43	193	31
	300	317	24	231	39	326	18	227	55
	500	1247	7	1478	9	506	16	659	15
№ 1 (Ti-s)	500	814	8	1083	12	349	28	532	18
Ti (4.4)	20	184	41	186	54	205	42	144	47
	300	361	33	275	32	344	27	272	39
	500	1009	0	1160	11	379	25	581	18

При съемке дифракционной картины в геометрии (Б-Б) происходит увеличение размера кристаллитов в объеме образца и, соответственно, снижение FWHM во всем диапазоне температур отжига для образцов с Be – слоем и Ti – фольги. После изохронного отжига образцов Ti – фольги 4,4 мкм с односторонним Be – слоем при температуре 700°C в течение 2ч бериллид титана BeTi полностью распадается.

Изотермические отжиги

Предварительные исследования не отожженных образцов после магнетронного нанесения слоя бериллия в стандартной геометрии (Б-Б) показали присутствие только фазы титана со значительным текстурированием структуры образцов Ti толщиной 8 и 10 мкм по кристаллографической плоскости с индексами hkl 103. Дифрактограммы (GR) показывают увеличенную степень текстурированности Ti по 002 на поверхности образца.

Сравнение дифрактограмм, записанных в геометрии (Б-Б) и (GR) позволило установить ориентационные эффекты формирования Be – слоя при магнетронном способе нанесения. Слой бериллия толщиной 2 мкм проявляется только на дифрактограмме, записанной в режиме (GR). При этом на дифрактограмме образца, записанной со стороны Be – слоя, регистрируется рефлекс Be (002). Измерение площади рефлекса позволяет контролировать изменение толщины Be – слоя на поверхности Ti – подложки при диффузионном отжиге. На дифракто-

граммах (Б-Б) дифракционные отражения от Be – слоя не регистрируются, что указывает на плохую окристаллизованность и текстурированность кристаллитов бериллия.

Результаты съемки дифракционных картин двух сторон образца по (GR) и в геометрии (Б-Б) показывают распределение фаз по глубине образца и различие состава объемной части и тыльной (без покрытия) поверхности образца.

Длительность первого этапа отжига составляла 0,5 ч, общая продолжительность – 75 ч; после каждого этапа отжига анализировалось влияние диффузии и фазовых превращений в слоистой системе бериллий – титан. Изотермический отжиг при температуре T = 500°C в течение 0,5 ч не изменяет фазового состава слоистой системе Be – Ti, однако на дифрактограмме (GR) начинает уменьшаться площадь рефлекса Be(002). Образцы титановой фольги толщиной 8 и 10 мкм с односторонним Be – покрытием при этом сильно деформировались и скрутились в трубки с Be – слоем внутри. Образцы Ti – фольги толщиной 45 и 50 мкм с двусторонним Be – покрытием деформировались в меньшей степени в виде коробления поверхности. На дифрактограммах, записанных с двух сторон образца Ti(8)+Be(2), деформационные искажения структуры титановой подложки проявляются как уширение дифракционных рефлексов (рисунок 3).

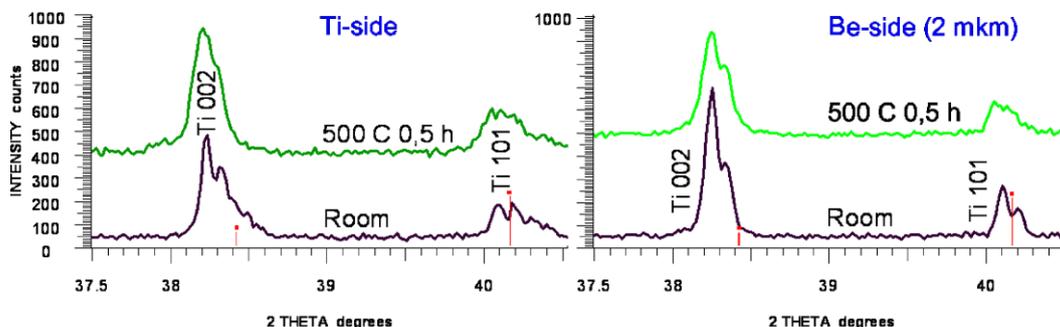


Рисунок 3. Сравнение формы дифракционных рефлексов Ti 002 и Ti 101 образца Ti(8)+Be(2) до и после отжига при 500°C 0,5 ч (Ti и Be – стороны подложки)

Перекристаллизация титановой подложки в процессе изотермического отжига изменяет соотношения интенсивностей рефлексов (002) и (101) титана, измеренных со стороны Be – слоя, при увеличении продолжительности изотермического отжига. Наблюдается также изменение структурного состояния титана (формы дифракционных отражений 002 и 101) по сравнению с дифрактограммой обратной стороны без покрытия. Эти особенности фазообразования, перекристаллизации и диффузии бериллия в слоистой системе Be – Ti при изотермическом отжиге наблюдаются в обоих режимах отжига. Отжиг в течение 1 ч приводит к появлению на дифрактограмме слабого дифракционного отражения (100) бериллида титана $BeTi$. После отжига в течение 10 ч на дифрактограмме Be – стороны образца, отжигаемого в режиме «заковки», появляется рефлекс бериллида Be_2Ti (220). Площадь рефлекса Be (002) уменьшается с увеличением длительности изотермического отжига. При длительном отжиге уменьшается также интенсивность рефлекса бериллида Be_2Ti (220) и возрастает площадь рефлекса бериллида $BeTi$ (100). Отмеченные особенности фазообразования, перекристаллизации в слоистой системе Be – Ti и диффузии бериллия при изотермическом отжиге наблюдаются также и при исследовании образца $Ti(10)+Be(2)$, при отжиге которого охлаждение проводилось также быстро.

При рентгенодифрактометрическом исследовании диффузионного фазообразования в двухслойных образцах системы Be – Ti на Ti – ленте толщиной 45 и 50 мкм в процессе последовательного изотермического высоковакуумного отжига установлено образование бериллидов титана и сохранение бериллида Be_2Ti на обеих сторонах подложки при длительном отжиге. Интегральные площади рефлексов $Be(002)$, бериллидов $BeTi$ (100), (110) и Be_2Ti (111), (220) характеризовали изменение содержания этих фаз при увеличении времени отжига. Значения полной ширины на половине максимума рефлексов титана (FWHM) использовались для контроля его перекристаллизации на последовательных этапах отжига. Минимальная величина FWHM рефлексов 002 и 101 титана измерена для не отожженного образца после магнетронного нанесения двухсторонних Be – слоев. До отжига регистрируются дифракционные рефлексы только титана и бериллия (GR). После отжига 5 ч на обеих сторонах подложки и в обоих режимах отжига образуются бериллиды $BeTi$ и Be_2Ti . Таким образом, особенностью фазообразования при использовании титановой фольгой толщиной 45 и 50 мкм с двухсторонними Be – покрытиями толщиной 1,3 и 2 мкм является кристаллизация двух бериллидов, сохранение бериллида Be_2Ti на обеих сторонах подложки при длительном отжиге.

На дифрактограмме двухслойного образца системы Be – Ti на Ti – ленте толщиной 45 мкм, записанной со стороны Be – слоя толщиной 2 мкм, реф-

лекс $Be(002)$ регистрируется до времени отжига 50 ч. Поэтому интегральная площадь рефлекса $BeTi$ (100) на дифрактограмме стороны слоя Be (2 мкм), пропорциональная содержанию этой фазы в поверхностном слое $x(e)$ (Б-Б), продолжает увеличиваться до времени отжига 50 ч. Интегральная площадь рефлекса $BeTi(100)$ на дифрактограмме стороны А (1,3 мкм) перестает увеличиваться после продолжения отжига более 20 ч (рисунок 4а).

Зависимости интегральной площади рефлекса Be_2Ti (220) от продолжительности отжига в режиме 1 показывают, что скорость образования бериллида Be_2Ti на начальных этапах отжига выше на стороне В. Затем содержание этого бериллида не увеличивается из-за роста концентрации $BeTi$ (рисунок 4 б).

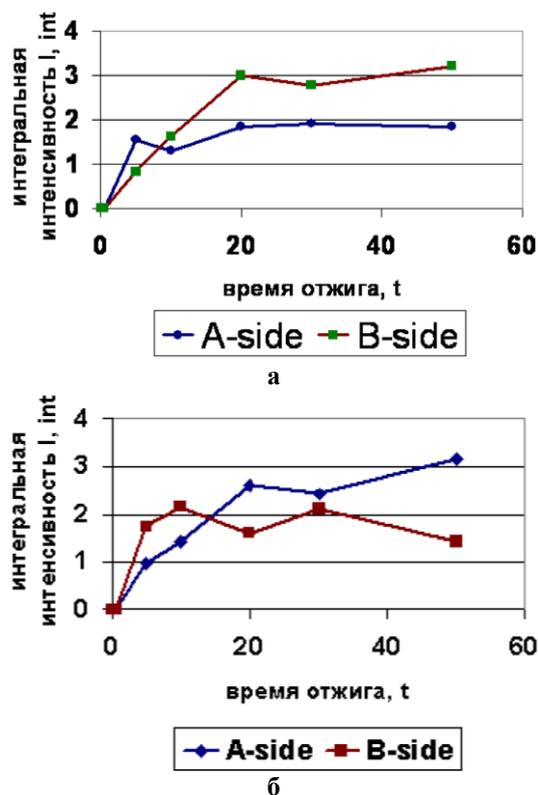


Рисунок 4. Образование бериллидов: а – $BeTi$; б – Be_2Ti при изотермическом отжиге образца Ti – ленты толщиной 45 мкм с двухсторонними слоями Be толщиной 1,3 (A-side) и 2 мкм (B-side), (режим отжига 1: без «заковки»)

При отжиге с быстрым остыванием образца на Ti – подложке толщиной 50 мкм с двухсторонним слоем Be толщиной 1,3 и 2 мкм соответственно бериллий на поверхности с Be-слоем толщиной 1,3 мкм (А – сторона) наблюдается после очередного цикла нагрева только до времени отжига 5ч. Со стороны В (толщина Be-слоя 2 мкм) наблюдается постепенное уменьшение площади рефлекса $Be(002)$, однако бериллий на этой стороне образца сохраняется до отжига 50 ч (рисунок 5).

Это связано, по-видимому, с замедлением диффузии бериллия в титановую подложку через обра-

зовавшийся слой бериллидов. Образование ВеТi при изотермическом отжиге в режиме 2 (быстрое остывание) продолжается на обеих сторонах образца до времени отжига 50 ч, причем ход зависимости интегральной площади рефлекса ВеТi (100) от продолжительности отжига для двух сторон образца практически совпадает.

Скорость образования бериллида Ве₂Тi на начальных этапах отжига выше на стороне В, также, как и при отжиге с медленным остыванием образца. Но далее циклический последовательный изотермический отжиг приводит к некоторому спаду содержания Ве₂Тi в анализируемом объеме после охлаждения образца, возможно, из-за частичного разложения этого бериллида и более предпочтительной кристаллизации ВеТi. Прекращение роста концентрации Ве₂Тi наблюдается и со стороны А (1,3 мкм), где также продолжается увеличение кристаллизации ВеТi до отжига 50 ч, в отличие от отжига в первом режиме.

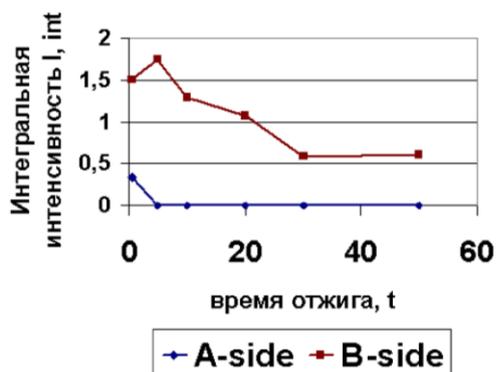


Рисунок 5. Уменьшение бериллия на сторонах титана при отжигах с «закалкой»

Эти особенности фазообразования в двухслойных образцах системы Ве – Тi в зависимости от режима отжига связаны с ограниченной диффузией бериллия в титан, ее зависимостью от температуры, возникновением неравновесных твердых растворов (расщепление рефлексов титана, рисунок 6), влиянием диффузии по границам зерен и перекристаллизацией титана после циклического отжига.

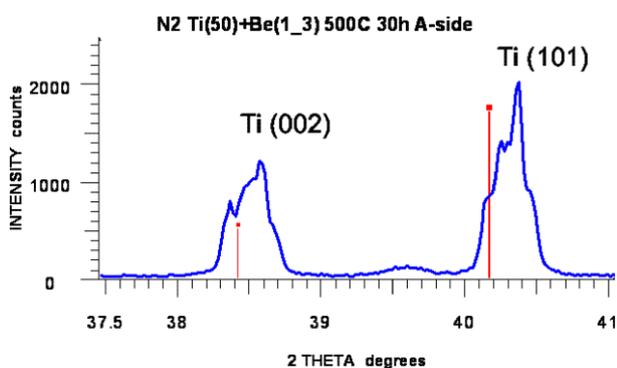


Рисунок 6. Расщепление рефлексов 002 и 101 Ti после отжига 30 ч, A-side (с «закалкой»)

Учитывая сложность происходящих изменений структурного состояния Тi – подложки и Ве – слоя, влияния большого числа неопределенных факторов на точность определения содержания бериллия в виде твердого раствора в α – Тi и в фазе ВеТi, для контроля термической диффузии бериллия в титановую подложку и фазообразования использовалась площадь дифракционного рефлекса Ве (002), измеренного при скользющем облучении образца первичным параллельным рентгеновским пучком (GR). Уменьшение интенсивности дифракционного рефлекса Ве (002) при изотермическом отжиге объясняется диффузией бериллия в титановую подложку, так как при выбранной температуре отжига Т = 500°С испарением бериллия за время отжига можно пренебречь.

Существующие методы рентгенографического определения коэффициентов диффузии основаны на прецизионном определении изменения параметра кристаллической решетки материала подложки при образовании твердого раствора с материалом, диффундирующим из поверхностного покрытия. В системе Ве – Тi при растворении бериллия в α – Тi параметры решетки твердого раствора по данным [6,8] изменяются от $a_0 = 0,29537$ нм, $c_0 = 0,47372$ нм для чистого α – Тi титана до $a_0 = 0,29615$ нм, $c_0 = 0,47495$ нм для сплавов, лежащих по составу на пределе растворимости (ниже 0,1 ат. д. Ве). Однако, значения растворимости Ве в α – Тi и β – Тi не однозначны [7, 8], также, как и приводимые значения параметров решетки чистого α – Тi.

Вычисленные по дифрактограммам, записанным в режиме (Б-Б) и (GR) от двух сторон образца Тi(8)+Ве(2) до и после каждого этапа изотермического отжига при 500°С параметры кристаллической ячейки титана показывают пределы изменения значения параметра a_0 гексагональной решетки титана: 0,29512-0,29524 нм (объем) и 0,29495-0,29504 нм (поверхность) для исходного образца со стороны с Ве – покрытием и после отжига в течение 75 ч. Аналогичное изменение параметра a_0 титана наблюдается и со стороны Тi – подложки: 0,29503- 0,29526 нм (объем) и 0,29502-0,29511 нм (поверхность).

Параметр c_0 решетки титана изменяется при этом в пределах: 0,46998-0,47049 нм (объем) и 0,46945-0,47041 нм (поверхность) для стороны с Ве – покрытием и 0,47007-0,47043 нм (объем) и 0,46965-0,47048 нм (поверхность) для Тi – стороны подложки. Пределы изменения параметров кристаллической ячейки титана, вычисленные для образцов титановой фольги толщиной 45 – 50 мкм с двусторонними Ве – покрытиями толщиной 1,3 и 2мкм в процессе изотермического отжига при 500°С сравнимы с приведенными для образца Тi(8)+Ве(2). Различия параметров a_0 и c_0 титана, измеренные со стороны с Ве – покрытием и со стороны Тi – подложки, для режимов с быстрым и медленным остыванием после каждого этапа циклического изотер-

мического отжига, для образцов титановой фольги толщиной от 4,4 до 50 мкм и с односторонними и двусторонними Ве – покрытиями толщиной 1,3 и 2 мкм, как и их изменения в процессе длительного изотермического отжига, незначительны, по сравнению с данными [6, 8]. Режим отжига с медленным остыванием после каждого этапа оказывает на процессы фазообразования влияние, аналогичное увеличению продолжительности отжига.

Наблюдаемые вариации параметров a_0 и c_0 у различных образцов α – Тi связаны, вероятно, как с диффузией бериллия, так и с повышенной растворимостью газов в титане. Поэтому использование параметров решетки титана для оценки растворения бериллия ограничено неопределенностью содержания растворенных газов. Проведенные эксперименты по отжигу образцов титановой фольги различной толщины с одно или двухсторонним Ве – покрытием показали, что в процессе термической диффузии наблюдаются фазовые превращения в слоистой системе Ве – Тi: фаза ВеТi начинает кристаллизоваться уже после 1 ч изотермического отжига при температуре $T = 500^\circ \text{C}$. Для оценки концентрации продифундировавшего в титан бериллия необходимо рассчитать его баланс с учетом частичного растворения в титане и образования фазы ВеТi.

Перекристаллизация титана подложки при изотермическом отжиге приводит к смещению, изменению формы и интенсивности дифракционных пиков титана, что вызвано деформационными искажениями и изменением размеров кристаллитов титана и частично газовой выделением. Это также увеличивает погрешность оценки количественного содержания новообразованных в процессе термической диффузии фаз.

Количественная оценка содержания этой фазы методами рентгенографии затруднена из-за отсутствия данных о корундовом числе бериллидов ВеТi и Ве₂Тi в базе PDF2. Изменение градиента концентрации бериллия по глубине подложки с увеличением длительности отжига тонкослойной системы Ве – Тi и зависимость глубины проникновения рентгеновского пучка от угла дифракции и геометрии съемки дифрактограмм ограничивают локальность количественной оценки соотношения кристаллических фаз зоной формирования дифракционного сигнала. Ввиду неоднородности состава по глубине образца, концентрационные количественные характеристики необходимо давать для поверхностных слоев определенной толщины.

Теоретический исходный состав анализируемого объема при съемке по геометрии (Б-Б) образца с толщиной слоя Ве 2 мкм и глубине проникновения рентгеновских лучей в титан 1,78 мкм (линия 002 Тi) отвечает формульным коэффициентам $Ti_{1,43} \text{ Ве}_{3,52} = (\text{ВеТi})_{0,29} \text{ Ве}_{0,42}$ или $C_{Ti} = 68,3 \%$ масс. и $C_{Ве} = 31,7 \%$ масс. Магнетронное нанесение Ве – покрытия и диффузионный отжиг влияют на кристалличес-

ность титана, изменяется фазовый состав и соотношение площади рефлексов титана, измеренных со стороны Ве – слоя и Тi – подложки образцов с односторонним покрытием. Наиболее резко снижается площадь рефлекса Тi (101) в поверхностном слое $x(e) = 1,86$ мкм под Ве – покрытием. Длительный отжиг приводит к относительному росту площади этого рефлекса. При измерениях со стороны Тi – подложки площадь рефлексов в процессе отжигов не изменяется. Измерение дифракционных отражений в геометрии (GR) также показывает влияние Ве – покрытия на площадь рефлексов титана. По относительному изменению площади рефлексов Тi (002), измеренной с двух сторон образца, было определено соотношение содержания титана, бериллия и бериллида ВеТi в анализируемом объеме ($x(e) = 1,78$ мкм) до отжига и после изотермического отжига в первом режиме (без «закалки») в течение 75 ч :

без отжига: $C_{Ti} = 90 \%$ масс.; $C_{Ве} = 10 \%$ масс.

отжиг 75 ч: $C_{Ti} = 99 \%$ масс.; $C_{ВеТi} = 1 \%$ масс.

после изотермического отжига во втором режиме (с «закалкой») в течение 75 ч:

без отжига: $C_{Ti} = 92 \%$ масс.; $C_{Ве} = 8 \%$ масс.

отжиг 75 ч: $C_{Ti} = 90 \%$ масс.; $C_{ВеТi} = 10 \%$ масс.

Содержание бериллия и бериллида ВеТi определены с учетом установленного фазового состава до отжига и после изотермического отжига в течение 75 ч. На промежуточных этапах отжига, когда наблюдается, также, фаза бериллида Ве₂Тi, для определения состава анализируемого объема использовалось отношение интенсивностей рефлексов бериллия и бериллидов к интенсивности рефлексов титана, измеренной с обратной стороны [4, 9]. Значения K_{ji} , вычисленные по анализам образцов титановой фольги с односторонними Ве – покрытиями были применены для определения соотношений содержания титана и бериллидов ВеТi, Ве₂Тi в анализируемом объеме после изотермического отжига в течение 50 ч образцов титановой фольги 45 и 50 мкм с двусторонними Ве – покрытиями толщиной 1,3 и 2 мкм:

$$K_{ji} = (S_j \cdot C_i) / (C_j \cdot S_i),$$

где S_j – площадь рефлекса Ве (002), ВеТi (100), Ве₂Тi (220); C_j – содержание в анализируемом объеме Ве, ВеТi, Ве₂Тi, соответственно; S_i – площадь рефлекса Тi (002); C_i – содержание титана в анализируемом объеме.

Титановая фольга 45 мкм:

Ве – слой толщиной 1,3 мкм: $C_{Ti} = 93,8 \%$ масс.; $C_{ВеТi} = 2,5 \%$ масс.; $C_{Ве2Тi} = 3,7 \%$ масс.

Ве – слой толщиной 2 мкм: $C_{Ti} = 93,9 \%$ масс.; $C_{ВеТi} = 4,3 \%$ масс.; $C_{Ве2Тi} = 1,6 \%$ масс.

Титановая фольга 50 мкм:

Ве – слой толщиной 1,3 мкм: $C_{Ti} = 92,3 \%$ масс.; $C_{ВеТi} = 6 \%$ масс.; $C_{Ве2Тi} = 1,6 \%$ масс.

Be – слой толщиной 2 мкм: $C_{Ti} = 91,9$ % масс.; $C_{BeTi} = 6,7$ % масс.; $C_{Be2Ti} = 1,4$ % масс.

Приведенные результаты получены после линеаризации измеренных значений площади рефлексов с учетом общей тенденции изменения фазового состава тонкослойной системы Be – Ti в процессе последовательного изотермического отжига. Используя эти соотношения и определенное ранее содержание титана в анализируемом объеме до отжига и после изотермического отжига в течение 75 ч, вычислено изменение содержания фаз бериллидов после каждого этапа отжига.

В рамках предложенной в [10, 11] физической модели термически индуцированных процессов диффузии и фазообразования в бинарных слоистых металлических системах, алгоритма расчета и компьютерной программы проведены расчеты для бинарных слоистых систем Be-Ti.

Был оценен выбор глубины $x_{эфф}$ проникновения рентгеновского излучения в бериллий и титан. На рисунке 7 приводятся рассчитанные в зависимости от угла дифракции значения $X_{эфф,Be}$ и $X_{эфф,Ti}$ — максимальной толщины приповерхностного слоя образца, соответствующие 99% вклада в интенсивность дифрагированного луча. Как видно, глубина проникновения дифрагированного рентгеновского луча в зависимости от угла дифракции изменяется от 1000 до 3000 мкм для бериллия и от 2 до 5 мкм для титана, т.е. сравнима с толщиной подложки, поэтому на поверхности образца могут регистрироваться ослабленные дифракционные максимумы фаз.

Теоретические расчеты показали (рисунок 8), что при диффузии Be в Ti при $T = 500^\circ C$ в приповерхностной зоне титана образуются слоистые структуры с различным содержанием фаз по глубине образца, соответствующим фазовой диаграмме состояний бинарной системы Be-Ti с учетом диффузионного синтеза бериллида BeTi.

Для достоверности интерпретации экспериментальных данных, полученных с помощью метода рентгеновской дифрактометрии, и теоретических результатов, описывающих процессы диффузии и фазообразования, необходимо учитывать фазовую диаграмму состояния системы Be – Ti [7]. В соответствии с фазовой диаграммой состояний бинарная система Be – Ti имеет в своем составе области растворимости Be в Ti, Ti в Be и несколько интерметаллических соединений: $TiBe_{12}$, $TiBe_3$, $TiBe_2$. При теоретических расчетах учитывались особенности фазовой диаграммы бинарной системы для температуры изотермического отжига $T_{отж} = 500^\circ C$, а именно: появление при данной температуре устойчивой фазы BeTi.

Как видно из рисунка 8, теория также предсказывает появление фаз $TiBe_{12}$ и $TiBe_3$ с низкой концентрацией. Однако в данном эксперименте эти фазы не были зарегистрированы вследствие недостаточной чувствительности применяемого оборудования.

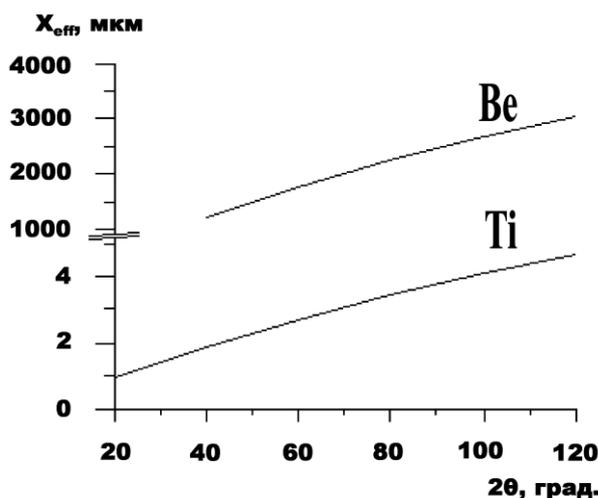
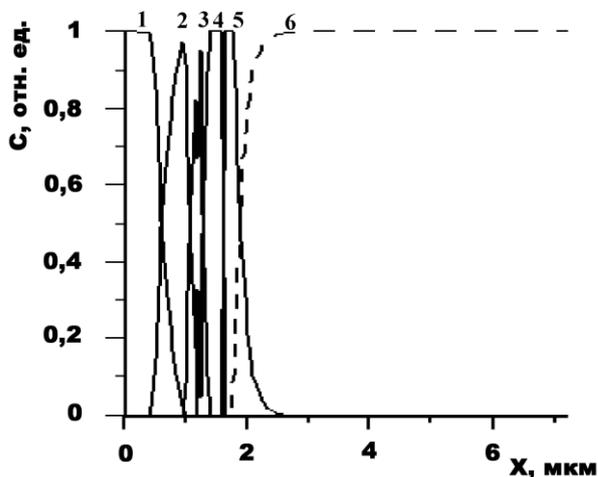


Рисунок 7. Эффективная глубина проникновения рентгеновского излучения CuK_{α} в бериллий и титан



1- (Be), 2- ($TiBe_{12}$), 3- ($TiBe_3$), 4- ($TiBe_2$), 5- ($TiBe$), 6- (Ti)

Рисунок 8. Относительное содержание образующихся в слоистой системе Ti – Be фаз в зависимости от глубины образца в начальный и конечный моменты времени отжига

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлены ориентационные эффекты образования Be – слоя при магнетронном методе нанесения покрытия. Дифракционный рефлекс Be (002) регистрируется только при малоугловом методе записи дифрактограмм (GR). Площадь рефлекса уменьшается при увеличении длительности изотермического отжига по мере диффузии бериллия в титан.

2. При изотермическом отжиге слоистой системы Be – Ti образуется бериллид BeTi, отсутствующий на фазовой диаграмме системы Be – Ti, построенной для кристаллизации расплавов. Дифракционный рефлекс (100) бериллида BeTi наблюдается при стандартном режиме съемки (Б-Б).

3. Рентгенодифрактометрическое исследование с малоугловым падением первичного пучка позволяет проследить влияние Be – слоя на перекристаллиза-

цию титана на поверхности подложки в процессе изотермического отжига и распределение фаз.

4. Экспериментальные исследования термической диффузии Ве и фазовые превращения в слоистой системе Ве – Тi на образцах с двусторонним Ве – покрытием позволили выяснить особенности формирования бериллидов ВеТi и Ве₂Тi и определить оптимальные температурные режимы обработки образцов.

5. Обнаружено ограничение диффузии Ве в Тi, что связано с образованием бериллидов, служащим

барьером для дальнейшей диффузии бериллия в объем титана.

6. Определено относительное содержание титана, бериллия, бериллидов титана в анализируемом объеме по относительному изменению площади рефлексов титана, бериллия и бериллидов.

7. Проведены расчеты для бинарных слоистых систем Ве-Тi. Показано, что при диффузии Ве в Тi при Т = 500°С в приповерхностной зоне титана образуются слоистые структуры бериллидов с различным содержанием фаз по глубине образца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кадыржанов, К. К. Физические основы ионных технологий создания стабильных многослойных металлических материалов / К. К. Кадыржанов, Т. Э. Туркебаев, А. Л. Удовский. – Алматы: ИЯФ НЯЦ РК, 2001. – 315 с.
2. Ионно-плазменная технология изготовления бериллиевой и бериллийсодержащей фольги / А. Ж. Тулеушев [и др.] // Вестник НЯЦ РК. – 2002. - вып. 4. - С. 26 - 31.
3. Горелик, С. С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ: Учебн. пособие для вузов / С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев. – М.: МИСИС, 2002. – 360 с.
4. Русаков, А. А. Рентгенография металлов / А. А. Русаков. - М., Атомиздат, 1977. – 480 с.
5. Ушатинский, И. Н. Методика и результаты изучения минералогии глин продуктивных отложений Западно-Сибирской низменности в связи с их нефтегазоносностью / И. Н. Ушатинский, Б.К. Килимник, С. И. Овчинников // Рентгеноструктурный анализ глинистых минералов: Тр. ЗапСибНИГНИ. – Тюмень, 1970. - вып. 35. - С. 27 – 64.
6. Барабаш, О. М. Структура и свойства металлов и сплавов. Кристаллическая структура металлов и сплавов. Справочник / О. М. Барабаш, Ю. Н. Коваль. – Киев: Наукова Думка, 1986.- С. 290-292.
7. Диаграммы состояния двойных металлических систем / Под ред. Н. П. Лякишева. - М.: Машиностроение, 1996.
8. Папиров, И. И. Структура и свойства сплавов бериллия / И. И. Папиров. – М.: Энергоиздат, 1981. - 368 с.
9. Фазообразование в тонкослойной системе Ве-Тi / А. Н. Поляков [и др.] // Вестник НЯЦ РК. – 2008. – вып. 3. – С. 80 – 83.
10. Кадыржанов К.К. Ионно–лучевая и ионно–плазменная модификация материалов / К.К. Кадыржанов [и др.]. – М.: Издательство МГУ, 2005, 673 с.
11. Физическая модель процессов диффузии и фазообразования в бинарных слоистых системах / В.С. Русаков [и др.] // Поверхность. - 2006. - № 1. - С. 33-40.

Ве – Тi ЖҮЙЕСІНДЕ ДИФфуЗИЯЛЫҚ ФАЗА ТҮЗІЛУ КЕЗІНДЕ РЕНТГЕНДИФРАКТОМЕТРИЯЛЫҚ СПЕКТРЛЕРДІҢ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Антонюк В.И., Поляков А.Н., Поддубная Е.В., Слюсарев А.П., Иманбеков Ж.Ж., Жанкадамова А.М.

ҚР ҰАО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

Бір және екіжақты Ве – жабындысы бар титандық жұқалтыр үлгілерінде бериллийдің титанға диффузиясын және Ве – Тi қабатты жүйесіндегі фазалық – құрылымдық түрленулерді зерттеу ВеТi және Ве₂Тi бериллидтердің қалыптасуы кезінде рентгендифрактометриялық спектрлерде біраз ерекшеліктерді айқындап берді.

Жабындыны магнетрондық әдіспен жалақан кезде Ве – қабат пайда болуының бағдарлық эффектілері белгіленген. Ве (002) дифракциялық рефлексі тек дифрактограммаларды (Grazing Incidence - GR) шағын бұрыштық әдіспен жазған кезде ғана тіркеледі. Бериллийқабаты бар Тi – жұқалтыр үлгілерін Т = 500°С болғанда 2 сағ.бойына изохронды күйдіру, балқымалардың кристалдануы үшін құрылған, ВеТi бериллидің синтезіне алып келеді.

Изохронды күйдірудің әрбір кезеңінен кейін үлгінің елгі жағынан Брегг-Брентано (Б–Б) мен (GR) тоғыстау режимінде жазып алынған дифрактограммалар бойынша титанның кристалдық ұяшығының параметрлері есептеп шығарылған. Тi – жұқалтырына Ве диффузиясының және Ве-Тi біржақты және екіжақты қабатты жүйесінде фаза түзілудің ерекшеліктері күйдірудің режимі мен қосынды ұзақтығына байланысты айқындалған.

Т = 500°С болғанда Ве – дің Тi – ға диффузиясы кезінде титанның беттікке таяу аймағында үлгінің тереңдігі бойына эралуан фазалар мөлшері бар, алынған эксперименттік деректерге сәйкесетін, қабатты құрылымдар пайда болатынын теориялық есептенелер көрсетіп берді.

**INVESTIGATION OF FEATURE X-RAY DIFFRACTOMETER SPECTRUMS
AT DIFFUSION PHASE FORMATION IN Be-Ti SYSTEM**

V.I. Antonjuk, A.N. Polyakov, E.V. Poddubnaja, A.P. Sljusarev, J.J. Imanbekov, A.M. Zhankadamova

Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty, Kazakhstan

Investigation of beryllium diffusion in titanium and phase-structure transformation in lamellar system Be-Ti on titanium substrate with one- and two-side Be-coating reveal some distinction in BeTi and Be₂Ti phases formation.

Orientation effects formation Be-layer deposited by magnetron sputtering method was established. Diffraction reflection Be (002) is registred only by small-angle method recording diffraction pattern (Grazing Incidence - GR). Isochronous annealing of Ti samples with Be layer at T = 500°C during 2 hour lead to synthesis BeTi phase, that is absent on phase diagram Be-Ti.

Dependence of Be diffusion in Ti foil and phase formation in lamellar Be-Ti system with one-side and two-side beryllium coverage from annealing regime and annealing duration are revealed.

The theoretical calculation are showed that Be diffusion in Ti at T = 500°C in near to surface zone in the lamellar Be-Ti system leads to formation of phase with different Be content through the sample depth. Theoretical calculation corresponds to experimental data.

УДК 539.183.3

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УСКОРЕННЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ С ТОНКИМИ МИШЕНЯМИ

Горлачев И., Князев Б., Колобердин М., Лысухин С., Пеньков Ф.

Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан

Приводятся результаты измерения сечений выхода K и L линий рентгеновского излучения, возникающего при взаимодействии ускоренных тяжелых ионов N , Ag и Kr с энергией 1 МэВ и 1.4 МэВ на нуклон с атомами мишеней. В экспериментах в качестве мишеней использовались пленки Cr , Ti , Cu , Ge , Nb , Ag , Sn , W , Ta , Pb толщиной до 200 мкг/см², осажденные на органическую подложку. Ускоренные пучки были получены на циклотроне ДЦ-60 в Астане.

ВВЕДЕНИЕ

История наблюдения рентгеновской эмиссии (РЭ) атомов, возбужденных заряженными частицами началась с начала двадцатого века в опытах по бомбардировке атомов α -частицами с характерными энергиями α -распадов 5–6 МэВ. Уже тогда было высказано предположение о возможном использовании ускоренных заряженных частиц с энергией 1–2 МэВ/нуклон для анализа химического состава образцов по характерным спектрам рентгеновской эмиссии, которая сопровождает процессы соударения частиц с исследуемой мишенью. Позже были промерены и идентифицированы РЭ-спектры всех элементов таблицы возбуждения, на основании которых был сформулирован метод анализа химического состава PIXE (particle induced X-ray emission), практика использования которого, позволила утверждать, что это самый высокочувствительный метод определения элементного состава, превосходящий и нейтроноактивационный, и масс-спектрометрические методы (например, обзор [1]). При этом в качестве бомбардирующих частиц обычно использовались протоны или α -частицы. Поскольку же РЭ происходит из-за выбивания электронов с нижних оболочек атомов, то частицы с большим зарядом имеют большее сечение ионизации при равных скоростях налетающих ионов, и их выгоднее использовать. Продолжая рассуждение далее можно было бы утверждать, что самый чувствительный метод анализа мог бы базироваться на ускорении тяжелых ионов. Однако оказалось, что уже использование достаточно легких ионов C , N , O приводит к заметным искажениям спектров РЭ – сдвигам и уширениям, а исследования спектров РЭ при соударении тяжелых ионов с мишенями дали столь сложную картину спектров, что путь от идеи применения пучков тяжелых ионов для PIXE до ее реализации оказался длинным и, собственно в настоящее время, только начинаются первые попытки технической реализации тяжелоионной PIXE.

В настоящее время уже очень много известно об особенностях тяжелоионной PIXE, о механизмах ионизации атомов мишени и о механизмах флуорес-

центного рентгеновского излучения [1,2]. Краткое резюме всей совокупности данных можно изложить одной фразой: в области энергий, подходящих для тяжелоионной PIXE существуют только качественные описания эффектов. Расчетные возможности описания ограничены как сложностью процессов, так и многообразностью условий столкновения. Ниже мы поясним эти термины.

Самые простые условия ионизации атомов налетающей частицей с зарядом Z возникают, когда скорость налетающей частицы много больше скоростей движения электронов в атоме. В этом случае применимо борновское приближение для амплитуды ионизации, первый порядок которого дает зависимость сечения ионизации от заряда $\sigma_{ion} \sim Z^2$. То есть сечение ионизации атома ионом с зарядом ядра Z будет в Z^2 раз больше сечения ионизации протоном при одинаковых скоростях движения. Так криптон с зарядом 36 будет давать атомных ионов и, следовательно, рентгеновских квантов на три порядка больше чем протон. Такой прямой механизм ионизации обычно называют кулоновским. Однако условия прямой кулоновской ионизации совсем не подходят для целей анализа химического состава, так как ионы, для которых выполняется условия борновского приближения, имеют энергию, при которой открыты каналы ядерных реакций. Для понимания этого рассмотрим случай столкновения криптона с криптоном, кинетическая энергия электронов K -оболочки которого, примерно в 36^2 раз больше энергии связи электрона в атоме водорода 13.6 эВ и примерно равна 17.6 кэВ. Ион криптона при скоростях равных электронным будет иметь кинетическую энергию в $M_{Kr}/m_e \approx 1.5 \cdot 10^5$ раз больше электронной, то есть 2.7 ГэВ. При такой энергии столкновения открыты все возможные каналы ядерных реакций. В этой оценке – масса электрона, а M_{Kr} – масса ^{84}Kr . Поэтому для целей аналитической PIXE требуются гораздо более низкие энергии. Так оценка кулоновского барьера для открытия канала ядерных реакций составляет [3] 296 МэВ, или 7 МэВ/нуклон энергии налетающего иона в лабораторной системе отсчета. Видно, что даже при пороговой энергии скорость налетающего

иона меньше скоростей электронов не только K , но и L оболочки.

При понижении скорости налетающего иона сечение кулоновской ионизации уже не является пропорциональным Z^2 и значительно падает из-за энергетической зависимости что, казалось бы, делает тяжелоионную PIXE малоприменимой для целей анализа. Однако опыт показывает, что при относительно невысоких энергиях сечения ионизации атомов тяжелыми ионами могут на 4-6 порядков превосходить сечения ионизации протонами [1,2]. Хороший пример такого эффекта приведен в работе [4], где показывается, что сечение ионизации K -оболочки углерода ионами аргона с энергией 2-3 кэВ/нуклон, такое же, как и протона с энергией 1 МэВ и составляет более 10^6 барн. Качественное объяснение этого эффекта было предложено в работе [5], которое заключается в возможности ионизации атомов при столкновении с ионами по молекулярному механизму в момент пересечения термов молекулы, состоящей из налетающего иона и атома мишени. Такой эффект, в принципе возможен, когда термы, происходящие из K -оболочек одиночных атомов, напрямую пересекаются с термами непрерывного спектра. Иначе предполагается механизм последовательного перехода от терма к терму вплоть до пересечения с термами непрерывного спектра. Как было понято позже, для этого необходимы вакансии в оболочках хотя бы одного из атомов молекулы. Более того, максимальный эффект проявляется при столкновении атома мишени с сильно ионизованной налетающей частицей. Именно из-за этого максимум сечения ионизации приходится не на равные заряды ядер налетающего иона и атома мишени, а сдвинут примерно на 4-5 зарядовых единиц. Так сечения выходов рентгеновского излучения K_α линий ионов никеля и брома в области энергий 0.6-1.6 МэВ/нуклон на широком диапазоне химических элементов, представленные в работе [6], имеют два острых максимума с полуширинами примерно в один заряд. Второй максимум сечения ионизации приходится на элементы, сдвинутые по заряду на 20-22 единицы [6]. При этом максимумы сечений практически не зависят от энергии падающей частицы, а определяются примерным совпадением энергий K -оболочек налетающей частицы и атомов мишеней для первого максимума и примерным совпадением энергий K -оболочки налетающей частицы и L -оболочки атомов мишеней. Сечения выходов излучения с атомов мишеней в работе [6] не исследовались.

Указанное выше экспериментальное доказательство идеи молекулярного механизма ионизации не являются единственными. Так в работе [7] показано, что вероятности ионизации аргона бомбардируемых элементами от фосфора до калия имеют резко выраженную ступенчатую (от 0 до 1) зависимость от расстояния между ядрами образуемых квазимолекул. Эти расстояния отвечают области пересечения термов этих молекул. Прямое

подтверждение факта существования квазимолекул с вакансиями в электронных оболочках получено при регистрации молекулярного рентгеновского излучения [8], которое значительно мягче атомного. А работе [9] наблюдались рентгеновские переходы M -линий объединенных атомов с зарядами 132, 143, и 145 в опытах по бомбардировке ионами ^{53}I мишеней из ^{79}Au , ^{90}Th и ^{92}U .

Как уже указывалось выше, молекулярные механизмы ионизации атомов предполагают не только сильную ионизацию падающих ионов из-за удаления электронов в верхних оболочках, но и обязательное присутствие вакансий на L -оболочках для K -переходов и M -оболочках для L -переходов. Наличие таких вакансий приводит к наблюдаемым сдвигам линий РЭ у падающих ионов. При этом сдвиги могут быть и положительные и отрицательные в зависимости от того, на что больше влияют вакансии. Если вакансии понижают энергию K -оболочки больше чем L , сдвиги положительные, иначе – отрицательные [2]. Величины этих сдвигов зависят от распределения вакансий и величины заряда ядра падающих ионов. При этом максимальный расчетный сдвиг превышает 100 эВ уже для ионов с Z больше 20 [2]. Существует и второй эффект, приводящий к эффективному сдвигу линий, связанный с появлением множества спутных линий из-за снятия вырождения в L - и M -оболочках при большом количестве вакансий. Эти вакансии уширяют спектры линий и могут сдвинуть «центр тяжести» наблюдаемой линии.

В случае больших сечений ионизации атомов мишени, все вышесказанное можно отнести и к их характеристическим спектрам. И уширение, и сдвиг линий. Такие условия можно реализовать при больших энергиях даже для прямой кулоновской ионизации. В частности, в работе [10], исследовались переходы на L оболочку палладия при бомбардировке ионами кислорода и неона с энергиями 17.4 и 8.9 МэВ/нуклон соответственно. Используя кристаллический спектрометр, авторы работы [10] наблюдали достаточно широкие пики с полуширинами в несколько сотен эВ, которые состояли из совокупности спутных пиков.

В настоящей работе представлены первые результаты исследований спектров РЭ и сечений их выходов при бомбардировках тонких мишеней из Cr, Ti, Cu, Ge, Nb, Ag, Sn, W, Ta и Pb пучками ионов азота, аргона и криптона с энергиями в 1 и 1.4 МэВ/нуклон. Выбор ионов для ускорения определялся простотой использования газовой среды для источника ионов, а выбор элементов мишеней определялся необходимостью охвата исследований большей области таблицы Менделеева с одной стороны и проверкой уже описанных эффектов и механизмов ионизации атомов мишеней, с другой. Кроме того, как показывают наши оценки, проведенные по формулам работы [11], равновесная степень ионизации

ции падающих ионов велика и мы можем наблюдать механизмы селективной молекулярной ионизации, отмеченные в работе [6]. Целью исследований было получение первичных данных для заключения о возможности и условиях постановки метода анализа химических элементов тяжелоионной РИХЕ.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Ускоритель тяжелых ионов ДЦ-60

Основной Междисциплинарного научно-исследовательского комплекса при Евразийском Национальном университете им. Л.Н.Гумилева в г. Астана является тяжелоионный циклотрон ДЦ-60, который может ускорять ионы от лития до ксенона в диапазоне энергий 0.4-1.7 МэВ/нуклон.

Циклотрон ДЦ-60 оборудован ионным источником с электрон-циклотронным резонансом (ЭЦР), способным генерировать пучки ионов в широком диапазоне масс и зарядов. Он может работать, как инжектор тяжелых ионов в циклотрон для получения пучков ионов высокой энергии, так и в автономном режиме, обеспечивая проведение экспериментов на пучках низкой энергии. Система аксиальной инжекции, состоящая из электромагнитных ионно-оптических элементов, блоков диагностики пучка, банчера и электростатического инфлектора, обеспечивает согласование инжектируемого в циклотрон пучка с ускоряющей структурой и оптимальный захват частиц в режим

ускорения. Ускорение происходит на 4 и 6 гармонике частоты обращения частиц в магнитном поле, сформированном 4-х секторным магнитом. Ускорительная структура состоит из двух четверть волновых резонаторов, двух 45-градусных дуантов с рабочим напряжением 50 кВ расположенных в долинах магнита и соединенных перемышкой. Питание ВЧ системы осуществляется от одного генератора с частотой от 11 до 17.4 МГц и мощностью 20 кВт. Вывод пучка из циклотрона осуществляется электростатическим дефлектором и пассивным магнитным каналом, снижающим влияние рассеянного магнитного поля. Система транспортировки обеспечивает разводку пучка к конечным экспериментальным станциям при помощи коммутирующего магнита и ионно-оптических элементов, формирующих пучок с необходимыми пространственными характеристиками. Для обеспечения максимальных возможностей для физических исследований и развития радиационных технологий, ускоритель оборудован двумя камерами для ионной имплантации, камерой рассеяния для экспериментов в области ядерной, атомной физики и ядерно-физических методов анализа поверхности, а так же, специализированной камерой облучения полимерных пленок для производства трековых мембран [12]. Схема циклотрона ДЦ-60 приведена на рисунке 1.

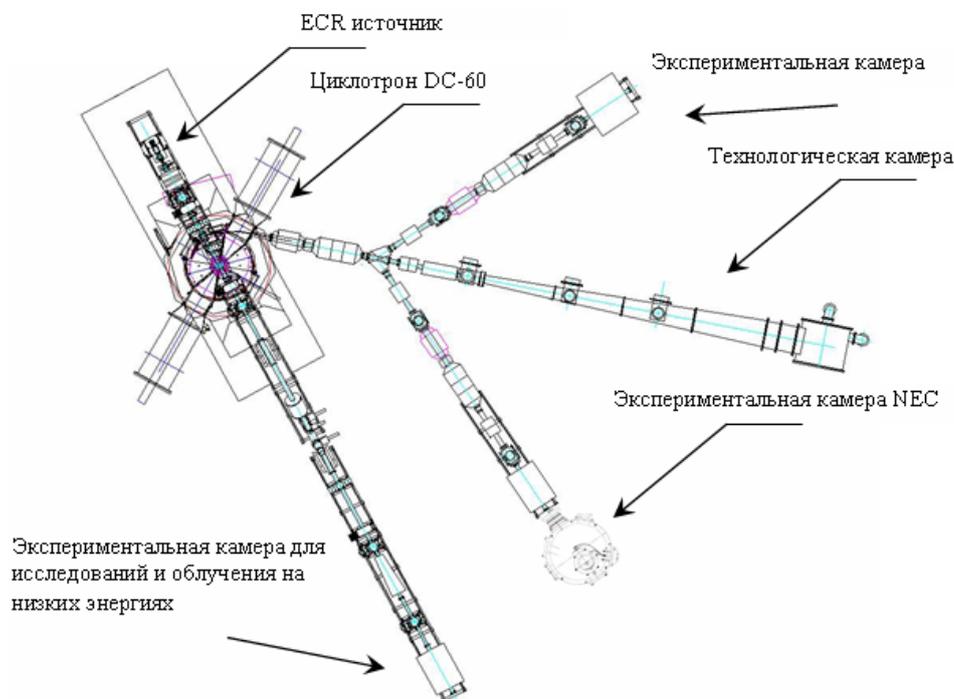


Рисунок 1. Схема ускорительного комплекса.

2. Мишенная камера

Экспериментальная камера RC-43 Endstation производства компании National Electrostatic Corporation (NEC), предназначенная для проведения ядерно-физических исследований на ускорителе ДЦ-60.

Камера изготовлена из цельного блока алюминия с внутренним диаметром 430 мм и внутренней высотой 200 мм. Основание камеры имеет толщину 50 мм для обеспечения стабильной поддерживающей базы для манипуляторов мишени, детекторов частиц, коллиматора пучка и турбомолекулярного насоса. Вакуумный шлюз для загрузки мишени располагается на крышке; он обеспечивает быструю (меньше чем за 5 минут) смену держателей мишени

без нарушения высокого вакуума в камере. Камера оснащена смотровым отверстием и видео камерой для регулировки положения мишени. Она электрически изолирована от “земли” с целью использования ее в качестве цилиндра Фарадея для измерения тока пучка.

Основой вакуумной системы камеры являются турбомолекулярный насос производительностью 250 л/с и форвакуумным насосом с производительностью 190 л/мин. Управляемые электромагнитные и пневматические затворы с соответствующими контроллерами и средствами измерения обеспечивают автоматическую откачку камеры или напуск воздуха.

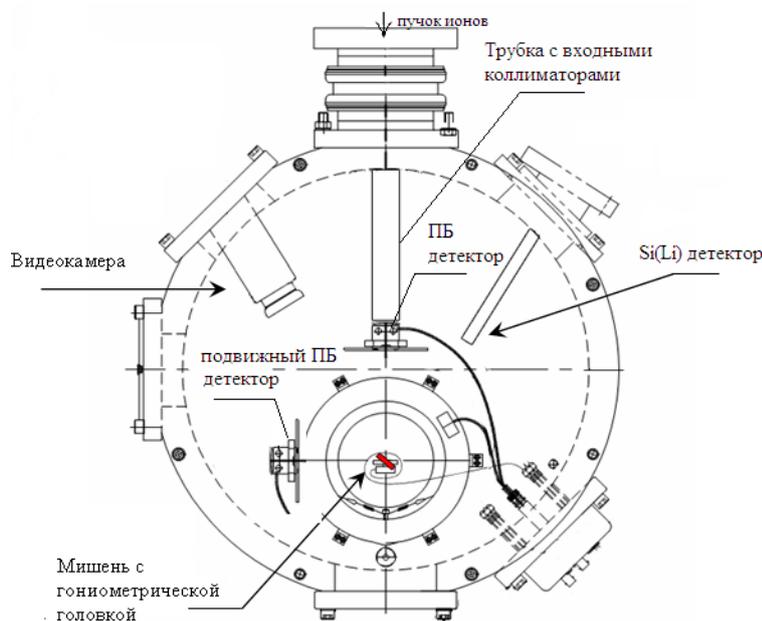


Рисунок 2. Мишенная камера NEC

Камера оснащена мишенным манипулятором с вакуумными двигателями и повторителями, обеспечивающими вращательное и возвратно-поступательное перемещение образца: X- и Z-движение на ± 8 мм и Y-движение на ± 50 мм с разрешением 0,0025 мм, Y или тета ось вращения (θ) на 90° с разрешением 0,01°. Вдоль оси Z или Фи (ϕ)-вращение непрерывное с разрешением 0.01°.

Для регистрации вторичного рентгеновского излучения в камере предусмотрен 30 мм^2 Si(Li) детектор, расположенный под углом 45° к направлению движения пучка, в комплекте со сменщиком рентгеновских фильтров, предусилителем, спектрометрическим усилителем и аналого-цифровым преобразователем. Ручное перемещение детектора с шагом 1 мм позволяет легко менять расстояние от мишени до кристалла анализатора, изменяя, таким образом, телесный угол, стягиваемый детектором. Программа GUPIXE, разработанная в университете Guelph, позволяет обрабатывать полученные спектры, опреде-

лять интенсивности рентгеновских пиков, вычислять содержания химических элементов и вычислять пределы обнаружения элементов для тонких и толстых образцов. Программа использует нелинейную подгонку методом наименьших квадратов с модификацией формы пика и учитывает наложения пиков, пики вылета, фон, материал фильтра, матричную коррекцию и вторичную флуоресценцию для толстых мишеней.

3. Эффективность регистрации рентгеновского излучения

Одним из параметров системы регистрации рентгеновского излучения, который входит в задачу расчета сечений выхода излучения является эффективность регистрации детектора. В наших экспериментах для регистрации рентгеновского излучения использовался Si(Li) детектор площадью 30 мм^2 , толщиной ~ 4 мм и мертвым слоем 0.2 мкм. Паспортное разрешение детектора составляет ~ 145 эВ на энергии 5.9 кэВ (K_α Mn). Для вакуумного разде-

ления системы регистрации и мишенной камеры перед кристаллом детектора располагается защитное органическое окно толщиной ~200 нм. Для уменьшения вклада низкоэнергетичного излучения в загрузку спектрометрического тракта в наших экспериментах между облучаемой мишенью и детектором размещалась дополнительная бериллиевая фольга толщиной 100 мкм.

Для усиления, формирования сигналов и накопления спектрометрической информации использо-

вались предусилитель, конструктивно расположенный в корпусе детектора, спектрометрический усилитель с системой питания детектора, изготовленные в виде отдельного переносного блока и многоканальный анализатор импульсов. Набор и предварительная обработка рентгеновских спектров осуществлялись с помощью программы MAESTRO.

Полученная кривая эффективности регистрации рентгеновского излучения представлена на рисунке 3.

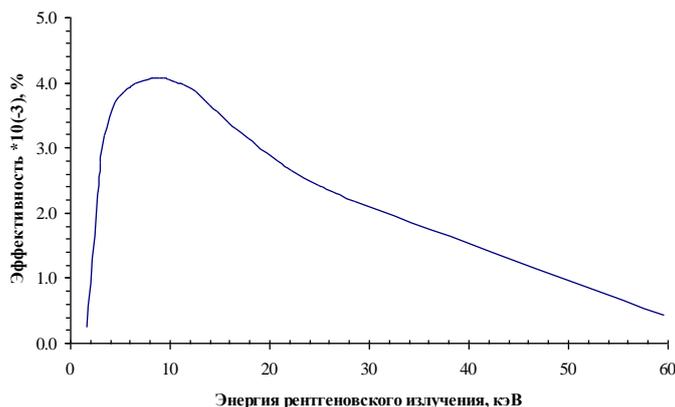


Рисунок 3. Кривая эффективности регистрации Si(Li) детектора

Для измерения кривой эффективности использовались два калибровочных источника Fe-55 и Am-241 активностью 49585 Бк и 10103 Бк на момент измерений, соответственно. Для построения кривой эффективности в качестве базовых использовались рентгеновские и гамма линии 5.895 кэВ и 6.491 кэВ для источника Fe-55 и 11.89 кэВ, 13.94 кэВ, 15.88 кэВ, 17.80 кэВ, 20.80 кэВ, 26.346 кэВ, 59.541 кэВ для источника Am-241.

С целью сохранения геометрических характеристик системы регистрации калибровочные источники устанавливались в месте положения облучаемых мишеней.

4. Экспериментальные процедуры

В экспериментах использовались ускоренные пучки N^{2+} , Ar^{5+} , Kr^{12+} с энергией 1 МэВ/нуклон, а также N^{2+} , Ar^{8+} , Kr^{13+} с энергией 1.4 МэВ/нуклон. Пучки транспортировались в мишенную камеру через входную диафрагму диаметром 3 мм.

Расчет сечений проводился по формуле:

$$\sigma = \frac{N_x M \cos(\vartheta)}{t \varepsilon N_p N_0}, \quad (1)$$

где N_x – число зарегистрированных рентгеновских квантов; M (г/моль) – атомная масса мишени ϑ – угол между направлением движения пучка и нормалью к мишени; t – толщина мишени (г/см²); ε – эффективность регистрации рентгеновского излучения; N_p – число заряженных частиц, упавших на

образец за время набора рентгеновского спектра; N_0 (моль⁻¹) – число Авогадро.

Геометрические условия проведения эксперимента определялись следующими значениями: расстояние от входной диафрагмы до мишени – 11.2 см; расстояние от мишени до детектора – 19.3 см; угол между детектором и осью пучка – 32°; углы между пучком и нормалью к мишени – 16°.

Измерение количества упавших на образец во время эксперимента частиц осуществлялось с помощью интегратора тока 439 фирмы ORTEC. Корректность измерения интеграла заряда во многом определяется в этом случае учетом вклада вторичной электронной эмиссии. Для исключения вклада выбитых электронов в регистрируемый ток ионного пучка была разработана система подавления вторичных электронов, внешний вид которой показан на рисунке 4.

Основой системы является постоянный магнит, обеспечивающий на поверхности образца магнитную индукцию ~150 Гс. Как показали эксперименты такого поля достаточно для полного запираения вторичных электронов.

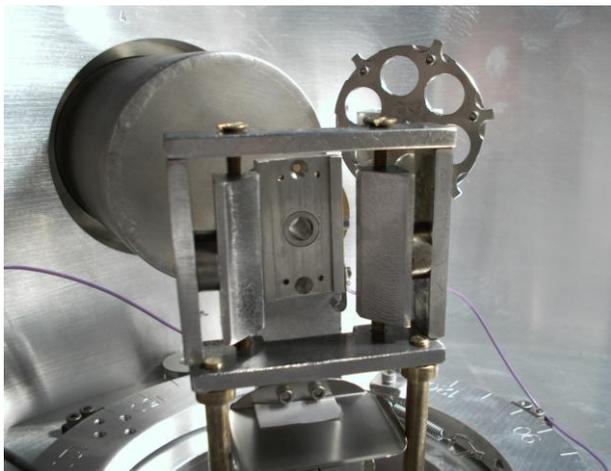


Рисунок 4. Внешний вид системы подавления вторичных электронов

Интеграл заряда на мишени в экспериментах варьировался в диапазоне от 300 до 1500 нКл в зависимости от требуемых условий статистической достоверности определения площадей под анализируемыми пиками. Эти условия, однако, удалось обеспечить не для всех элементов и линий, что обусловлено особенностями облучаемых образцов. Металлические пленки, рентгеновские линии от которых регистрировались Si(Li) детектором, напылялись на полиэтиленовую подложку, неустойчивую к радиационному воздействию и нагреву. Учитывая, что основная мощность пучка высаживалась именно в полиэтилене, это могло привести как к термически стимулированной диффузии покрытия в подложку, так и к деструкции облучаемой области образца. Для исключения подобных нежелательных эффектов в экспериментах ограничивалось время и доза облучения образцов. Это привело к появлению дополнительных погрешностей в определении скоростей счета, обусловленных статистической несостоятельностью отдельных, в особенности высокоэнергетических, рентгеновских линий. Для уменьшения статистических ошибок предполагается в дальнейших исследованиях изменить схему эксперимента и структуру мишеней.

5. Измерение толщин облучаемых пленок

Как известно [13] сечение выхода флуоресценции сильно зависит от энергии первичного пучка. Учитывая, что при прохождении ускоренного ионного пучка через облучаемый образец происходит потеря энергии частиц за счет взаимодействия с электронами и ядрами мишени, энергия ионов на выходе из образ-

ца может существенно отличаться от первоначальной энергии пучка. Доля теряемой энергии определяется в этом случае средним атомным номером и толщиной мишени. В интегральном спектре рентгеновского излучения, регистрируемого детектором, присутствуют кванты, выходящие из разных слоев образца и возбуждаемые, таким образом, частицами разных энергий. Поэтому выделить из общего рентгеновского спектра от толстого образца (потери энергии в образце сравнимы с энергией пучка) долю квантов, приходящийся на каждый отдельный энергетический слой и построить зависимость выхода рентгеновского излучения от энергии пучка практически невозможно. Поэтому, как правило, измерение сечений проводится на тонких пленках, потери энергии первичного пучка в которых гораздо меньше энергии налетающих ионов. В этом случае энергия ускоренных частиц считается неизменной на всем пути прохождения ионов через вещество мишени. При этом возникает необходимость измерения толщины слоя, участвующего в процессе испускания характеристического излучения.

Измерение сечений выхода флуоресценции производилось из пленок чистых элементов, напыленных методом ионно-плазменного осаждения на полиэтиленовую подложку толщиной ~ 140 мкм. Выбор типа подложки определялся в данном случае отсутствием в полиэтилене химических элементов, характеристическое излучение от которых наблюдалось бы в регистрируемом рентгеновском спектре.

Измерение толщин напыленных пленок проводилось в ИЯФ НЯЦ РК на ускорителе УКП-2-1 методом резерфордского обратного рассеяния (РОР). В экспериментах использовался ускоренный пучок протонов с энергией 1 МэВ. При обработке полученных спектров и вычислении толщин пленок использовалась программа RUMP. Полученные толщины с указанием энергетических потерь в них и средних энергий для ускоренных ионов N, Ag и K α представлены в таблицах 1, 2 и 3 соответственно. Энергетические потери ионов в веществе были рассчитаны с помощью программы TRIM.

Как следует из таблиц 1-3 отношение потери энергии первичного пучка к самой энергии $\Delta E/E$ для всех типов ионов, мишеней и энергий лежат в диапазоне от 0.4 % до 2.1 %. Это дает право считать, что используемые в экспериментах образцы являются тонкими и не учитывать потерь энергии ионов внутри пленок.

**ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УСКОРЕННЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ С ТОНКИМИ МИШЕНЯМИ**

Таблица 1. Толщины напыленных пленок, энергетические потери в них и средние значения энергий для ускоренных ионов N^{2+}

Тип мишени	Толщина, мкг/см ²	N^{2+} , 14 МэВ			N^{2+} , 19.6 МэВ		
		Потери, кэВ/(мкг/см ²)	Средняя энергия в мишени, МэВ	ΔE/E, %	Потери, кэВ/(мкг/см ²)	Средняя энергия в мишени, МэВ	ΔE/E, %
Ti	38	4.68	13.9	0.6	4.19	19.5	0.4
Cr	48	4.42	13.9	0.8	3.97	19.5	0.5
Cu	87	3.78	13.8	1.2	3.50	19.4	0.8
Ge	74	3.57	13.9	0.9	3.34	19.5	0.6
Nb	57	3.56	13.9	0.7	3.22	19.5	0.5
Ag	168	3.00	13.7	1.8	2.76	19.4	1.2
Sn	73	2.83	13.9	0.7	2.59	19.5	0.5
Ta	165	2.18	13.8	1.3	2.07	19.4	0.9
W	202	2.07	13.8	1.5	1.92	19.4	1.0
Pb	192	2.01	13.8	1.4	1.91	19.4	0.9

Таблица 2. Толщины напыленных пленок, энергетические потери в них и средние значения энергий для ускоренных ионов Ar^{5+} и Ar^{8+}

Тип мишени	Толщина, мкг/см ²	Ar^{5+} , 40 МэВ			Ar^{8+} , 56 МэВ		
		Потери, кэВ/(мкг/см ²)	Средняя энергия в мишени, МэВ	ΔE/E, %	Потери, кэВ/(мкг/см ²)	Средняя энергия в мишени, МэВ	ΔE/E, %
Ti	38	16.6	39.7	0.8	16.2	55.7	0.5
Cr	48	15.7	39.6	0.9	15.4	55.6	0.7
Cu	87	13.4	39.4	1.5	13.5	55.4	1.0
Ge	74	12.7	39.5	1.2	12.9	55.5	0.9
Nb	57	12.6	39.6	0.9	12.5	55.6	0.6
Ag	168	10.6	39.1	2.2	10.6	55.1	1.6
Sn	73	10.0	39.6	0.9	10.0	55.6	0.7
Ta	165	7.73	39.4	1.6	7.94	55.3	1.2
W	202	7.32	39.3	1.8	7.40	55.3	1.3
Pb	192	7.12	39.3	1.7	7.32	55.3	1.3

Таблица 3. Толщины напыленных пленок, энергетические потери в них и средние значения энергий для ускоренных ионов Kr^{12+} и Kr^{13+}

Тип мишени	Толщина, мкг/см ²	Kr^{12+} , 84 МэВ			Kr^{13+} , 118 МэВ		
		Потери, кэВ/(мкг/см ²)	Средняя энергия в мишени, МэВ	ΔE/E, %	Потери, кэВ/(мкг/см ²)	Средняя энергия в мишени, МэВ	ΔE/E, %
Ti	38	32.5	83.4	0.7	34.4	117.3	0.6
Cr	48	30.7	83.3	0.9	32.6	117.2	0.7
Cu	87	26.3	82.9	1.4	28.7	116.8	1.1
Ge	74	24.8	83.1	1.1	27.4	117.0	0.9
Nb	57	24.7	83.3	0.8	26.5	117.2	0.6
Ag	168	20.9	82.2	2.1	22.7	116.1	1.6
Sn	73	19.6	83.3	0.9	21.3	117.2	0.7
Ta	165	15.1	82.8	1.5	17.0	116.6	1.2
W	202	14.3	82.6	1.7	15.8	116.4	1.4
Pb	192	14.0	82.7	1.6	15.6	116.5	1.3

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

1. Измерение абсолютных сечений выхода флуоресценции

На рисунках 5-10 показаны рентгеновские спектры, полученные при облучении мишеней ускоренными пучками азота, аргона и криптона. Особенностью спектров в сравнении с возбуждением этих же атомов рентгеновским излучением и протонами является

большой уровень низкоэнергетичного фона, обусловленного тормозным излучением ионов в мишени и вторичных электронов. Помимо этого при возбуждении тяжелыми ионами наблюдается уширение и смещение рентгеновских линий. При взаимодействии атомов мишени с ионами аргона и криптона в рентгеновских спектрах присутствуют соответственно линии Ar и Kr.

**ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УСКОРЕННЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ С ТОНКИМИ МИШЕНЯМИ**

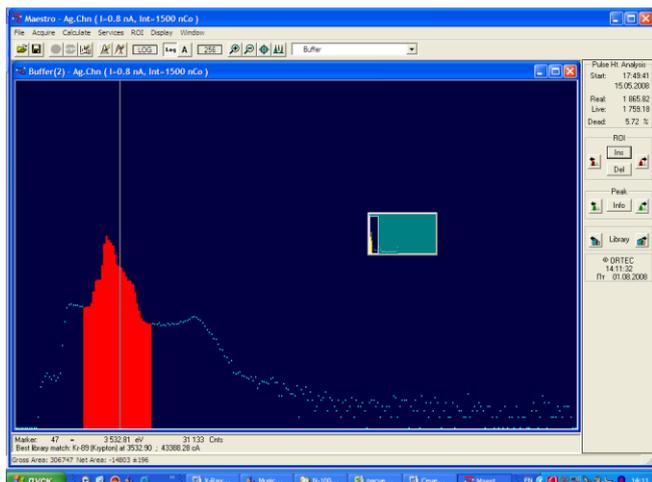


Рисунок 5. Рентгеновский спектр от мишени Ag, бомбардируемой ионами N^{2+} с энергией 19.6 МэВ. Выделен пик Ag L

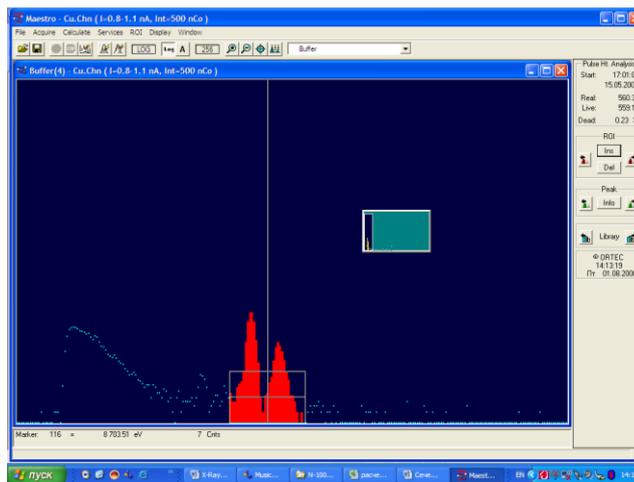


Рисунок 6. Рентгеновский спектр от мишени Cu, бомбардируемой ионами N^{2+} с энергией 19.6 МэВ. Выделены пики Ka и Kb меди

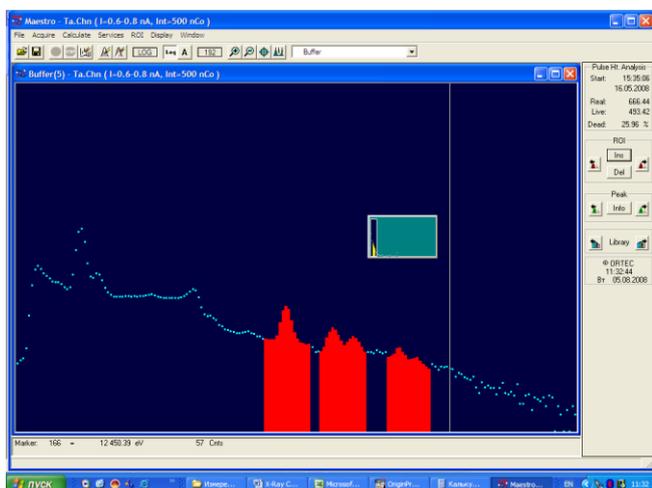


Рисунок 7. Рентгеновский спектр от мишени Ta, бомбардируемой ионами Ar^{8+} с энергией 56 МэВ. Выделены пики Ta La, Lb и Lg

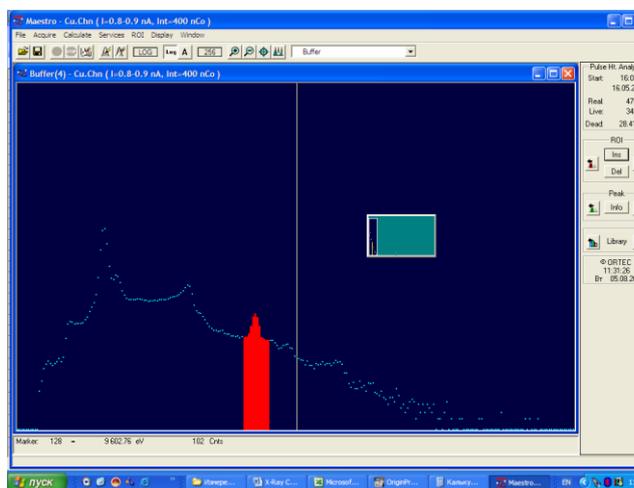


Рисунок 8. Рентгеновский спектр от мишени Cu, бомбардируемой ионами Ar^{8+} с энергией 56 МэВ. Выделен пик Ka меди

В таблице 4 приведены вычисленные в соответствии с (1) значения сечений для ионов N^{2+} с энергией 14 МэВ и 19.6 МэВ, а также полученные смещения рентгеновских линий. В таблицах 5 и 6 приведены эти же параметры соответственно для ускоренных ионов аргона с энергиями 40 МэВ и 56 МэВ и криптона с энергиями 84 МэВ и 118 МэВ. Графически полученные зависимости сечений вы-

хода флуоресценции от атомного номера мишени для разных типов и энергий налетающих частиц представлены на рисунках 11 и 12. На рисунках показаны также сечения выхода флуоресценции при возбуждении атомов мишеней ускоренными протонными пучками с энергией 1 МэВ и 1.4 МэВ полученные на основании данных, приведенных в [14].

**ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УСКОРЕННЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ С ТОНКИМИ МИШЕНЯМИ**

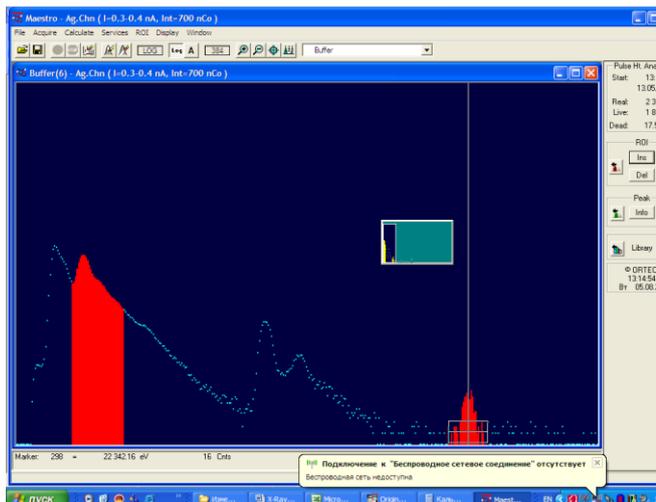


Рисунок 9. Рентгеновский спектр от мишени Ag, бомбардируемой ионами Kr^{13+} с энергией 118 МэВ. Выделены пики Ag L и Cu Ka

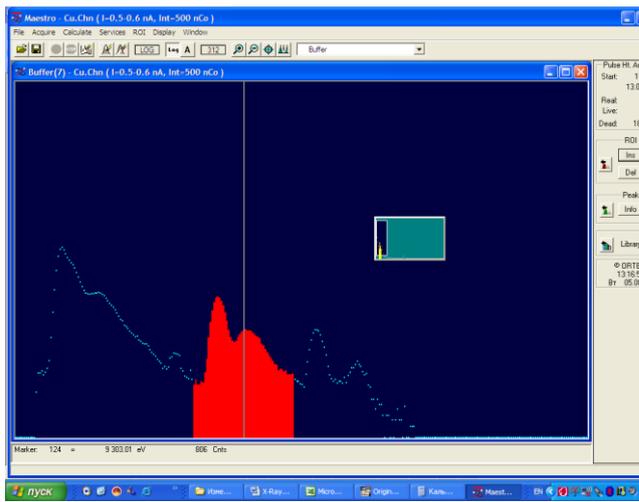


Рисунок 10. Рентгеновский спектр от мишени Cu, бомбардируемой ионами Kr^{13+} с энергией 118 МэВ. Выделены пики Ka и Kb меди

Таблица 4. Сечения выхода флуоресценции для ионов N^{2+} с энергией 14 МэВ и 19.6 МэВ и смещения рентгеновских линий

Элемент	Атомный номер	Линия	Сечение выхода флуоресценции, барн		Смещение рентгеновских линий, эВ	
			N^{2+} 14 МэВ	N^{2+} 19.6 МэВ	N^{2+} 14 МэВ	N^{2+} 19.6 МэВ
<i>K-линии</i>						
Ti	22	Ka	249	1025	64	69
		Kb	32.2	131	156	159
Cr	24	Ka	207	1044	69	66
		Kb	31.7	189	161	166
Cu	29	Ka	27.4	84.1	48	59
		Kb	4.62	14.1	131	150
Ge	32	Ka	11.9	47.4	23	37
		Kb	2.16	8.89	116	141
Nb	41	Ka	1.69	2.41	-3	1
		Kb	0.34	0.64		
Ag	47	Ka	0.37	2.20	-28	-13
		Kb		0.50		
<i>L-линии</i>						
Ag	47	L	2638	8612	56	65
Sn	50	L	2397	4765	65	78
Ta	73	La	86.3	183	12	20
		Lb	77.8	109	17	28
		Lg	54.2	104	70	57
W	74	La	50.4	66.8	15	23
		Lb	27.2	79.5	22	26
		Lg	5.66	13.4	16	61
Pb	82	La	7.28	9.76	13	6
		Lb	17.6	51.9	16	19
		Lg	2.74	9.29	33	49

Таблица 5. Сечения выхода флуоресценции для ионов Ar^{5+} с энергией 40 МэВ и Ar^{8+} с энергией 56 МэВ и смещения рентгеновских линий

Элемент	Атомный номер	Линия	Сечение выхода флуоресценции, барн		Смещение рентгеновских линий, эВ	
			Ar^{5+} 40 МэВ	Ar^{8+} 56 МэВ	Ar^{5+} 40 МэВ	Ar^{8+} 56 МэВ
<i>K-линии</i>						
Ti	22	Ka	4610	5075	90	91
		Kb	538		229	
Cr	24	Ka	4160	8905	100	
Cu	29	Ka	118	425	80	92
		Kb	10	32	275	
Ge	32	Ka	21	60	71	93
		Kb	3.0	15		253
Nb	41	Ka		1.9		21
Ag	47	Ka		0.8		1

**ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УСКОРЕННЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ С ТОНКИМИ МИШЕНЯМИ**

Элемент	Атомный номер	Линия	Сечение выхода флуоресценции, барн		Смещение рентгеновских линий, эВ	
			Ar ³⁺ 40 МэВ	Ar ⁸⁺ 56 МэВ	Ar ³⁺ 40 МэВ	Ar ⁸⁺ 56 МэВ
<i>L-линии</i>						
Ta	73	La	292	1008	74	76
		Lb	102	374	72	64
		Lg	6.7	36	286	213
W	74	La	394	651	76	78
		Lb	135	242	78	71
		Lg	11	20	182	150
Pb	82	La	119	307	63	58
		Lb	54	177	207	74
		Lg	8.0	31	156	303

Таблица 6. Сечения выхода флуоресценции для ионов Kr¹²⁺ с энергией 84 МэВ и Kr¹³⁺ с энергией 118 МэВ и смещения рентгеновских линий

Элемент	Атомный номер	Линия	Сечение выхода флуоресценции, барн		Смещение рентгеновских линий, эВ	
			Kr ¹²⁺ 84 МэВ	Kr ¹³⁺ 118 МэВ	Kr ¹²⁺ 84 МэВ	Kr ¹³⁺ 118 МэВ
<i>K-линии</i>						
Ti	22	Ka	2952	3648	100	171
		Kb	241		243	
Cr	24	Ka	8440	13204	97	159
		Kb	1192	680	248	363
Cu	29	Ka	3511	4952	114	199
		Kb	506	787	338	427
Ge	32	Ka	2630	4897	90	157
		Kb	334	227	387	2262
Nb	41	Ka	153	436	84	155
		Kb	17	18	232	463
Ag	47	Ka	2.8	16	10	178
<i>L-линии</i>						
Ag	47	L	50242	90970	131	230
Sn	50	L	42227	98322	152	203
Ta	73	La	4558		51	
		Lb	2286		99	
		Lg	122		431	
W	74	La	2760		145	
		Lb	3330		109	
		Lg			329	
Pb	82	La	2345	4782	124	183
		Lb	456	639	-287	-294
		Lg	91	185	583	700

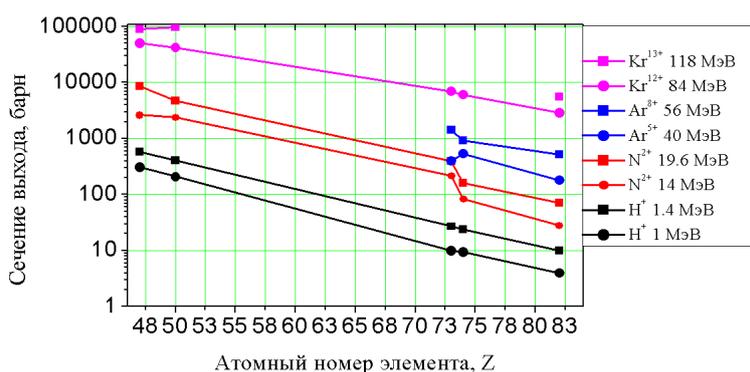


Рисунок 11. Зависимости сечений выхода флуоресценции для L-оболочек от атомного номера мишени для разных типов и энергий налетающих частиц

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УСКОРЕННЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ С ТОНКИМИ МИШЕНЯМИ

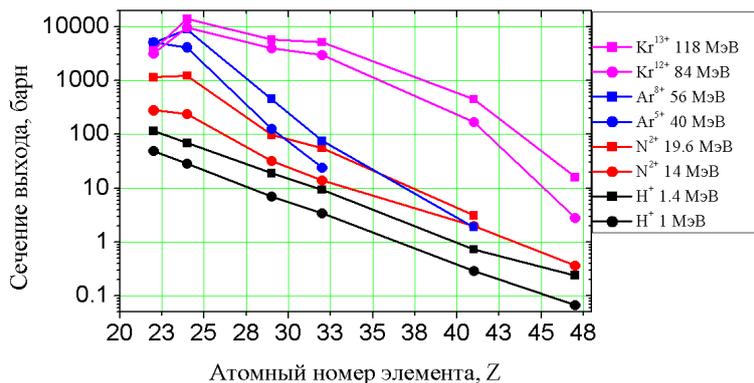


Рисунок 12. Зависимости сечений выхода флуоресценции для *K*-оболочек от атомного номера мишени для разных типов и энергий налетающих частиц

Как можно заметить из рисунков 7-10 при возбуждении рентгеновского излучения ионами аргона и криптона в спектрах помимо характеристических линий элементов мишеней присутствуют также *K* линия Ag или *K* и *L* линии Kг, обусловленные переходами электронов на внутренние оболочки налетающих частиц. Для этих линий также были рассчитаны сечения выхода флуоресценции, представленные в таблице 7 и на рисунке 13. В таб-

лице 8 указаны смещения по энергии рентгеновских линий, испускаемых налетающими частицами.

Данные таблицы 8 показывают, что для *K*-переходов аргона энергетическое смещение практически отсутствует. В то же время для криптона *L*-переходы, так же как и большинство переходов для атомов мишеней (таблицы 4-6), смещены в более высокоэнергетичную область, а *K*-переходы наоборот – в низкоэнергетичную область.

Таблица 7. Сечения выхода флуоресценции для *K*- и *L*-переходов налетающих частиц (аргон и криптон)

Элемент	Атомный номер, Z	Сумма по <i>K</i> переходам Ar		Сумма по <i>L</i> переходам Kг		<i>K_α</i> переход Kг	
		40 МэВ	56 МэВ	84 МэВ	118 МэВ	84 МэВ	118 МэВ
Ti	22	130369	359263	6229785	9943490	336	1452
Cr	24	109503	310987	4106468	9428350	347	1605
Cu	29	28358	95299	1330839	2411276	311	902
Ge	32	35649	133388	1864364	5032998	634	1970
Nb	41	49918	133103	2252138	5210775	1192	2781
Ag	47		58811	481272	1244045	297	831
Sn	50	41372	131689	1690862	5772515	309	1265
Ta	73	8701	42700	773838		108	
W	74	8518	28652	931561		184	
Pb	82	10187	27603			352	1018

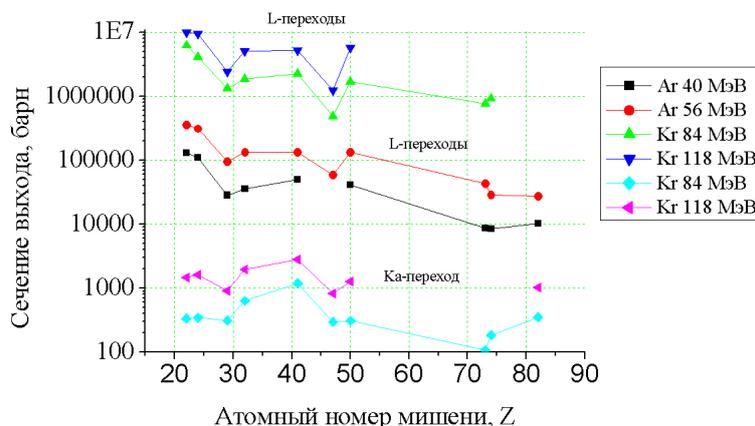


Рисунок 13. Зависимости сечений выхода флуоресценции для *K*- и *L*-переходов налетающих частиц (аргон и криптон) от атомного номера мишени.

**ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УСКОРЕННЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ С ТОНКИМИ МИШЕНЯМИ**

Таблица 8. Смещения по энергии рентгеновских линий, испускаемых налетающими частицами.

Элемент	Атомный номер, Z	Смещение K-линии аргона, эВ		Смещение L-линии криптона, эВ		Смещение K-линии криптона, эВ	
		40 МэВ	56 МэВ	84 МэВ	118 МэВ	84 МэВ	118 МэВ
Ti	22	0	0	154	281	-399	-399
Cr	24	0	0	164	267	-401	-406
Cu	29	0	0	168	260	-384	-382
Ge	32	0	0	179	269	-406	-428
Nb	41	0	0	191	284	-403	-404
Ag	47		0	171	267	-393	-367
Sn	50	1	1	173	274	-397	-392
Ta	73	1	0	183		-379	
W	74	1	0	131		-443	
Pb	82	0	0			-370	-413

2. Обобщение и обсуждение результатов

Анализ литературных источников показал, что за последние тридцать лет опубликовано достаточно много работ, посвященных исследованию сечений ионизации внутренних оболочек атомов различных элементов и расчету сечений выхода флуоресценции для ускоренных легких ионов (протоны, дейтроны, гелий). В то же время подобных данных для тяжелых ионов в публикациях очень немного, а имеющиеся – не носят систематического характера. Это объясняется несколькими причинами. На практике сечения выхода флуоресценции используются для определения на основании регистрируемых спектров рентгеновского излучения элементного состава анализируемых образцов. В большинстве лабораторий в качестве источников тяжелых ионов с энергиями более 0.5 МэВ/нуклон используются циклотроны, которые, как правило, не ориентированы и не оснащены необходимой аппаратурой для элементного анализа. Как видно из рисунков 5 – 10 рентгеновские спектры, полученные при возбуждении атомов мишеней тяжелыми частицами, имеют высокий уровень фона, обусловленного тормозным излучением тяжелых частиц и вторичных электронов в сравнении с возбуждением протонным пучком и первичным рентгеновским излучением. Это приводит к ухудшению чувствительности метода при анализе элементного состава образцов. Рисунки 5 – 10 наряду с таблицами 4 – 6 иллюстрируют также уширение и смещение по энергии характеристических рентгеновских линий, что сильно усложняет обработку и идентификации пиков.

Ограниченность литературных данных по сечениям выхода рентгеновской флуоресценции, возбуждаемой тяжелыми ионами, осложняет сравнение наших результатов с данными, полученными в других лабораториях. Таблица 9 содержит сечения вы-

хода флуоресценции, полученные в наших экспериментах, и представленные в [15] для ускоренных пучков аргона с энергиями 40 МэВ и 56 МэВ. Отличия в данных, полученных в разных лабораториях могут быть объяснены статистическими погрешностями нашего эксперимента и методическими неопределенностями работы [15], где использовались достаточно толстые образцы, относительные потери энергии первичного пучка в которых $\Delta E/E$ достигали 22%, что приводит к недопустимости пренебрежения изменения энергии ионов внутри материала мишени.

По нашим оценкам погрешности данных по сечениям выхода флуоресценции, представленные в таблицах 5-7, лежат в диапазоне от 30% до 50%. Так как в работе [15] подобные оценки не приведены, трудно однозначно сказать какие из представленных в таблице 9 данных являются более достоверными. В последующих экспериментах мы рассчитываем уменьшить погрешности получаемых данных.

В таблице 10 и на рисунках 14 и 15 представлены отношения выходов флуоресценции для разных атомных переходов La/Lb , La/Lg и Ka/Kb . Для сравнения на рисунках также показаны отношения La/Lb , La/Lg и Ka/Kb при возбуждении атомов рентгеновским пучком. Для большинства отношений наблюдается слабая зависимость от атомного номера возбуждаемого химического элемента. Исключение составляет возбуждение внутренних атомных оболочек ускоренными пучками криптона. В этом случае имеется значительное уменьшение отношений La/Lg и Ka/Kb при возбуждении криптоном атомов меди.

В таблице 11 и на рисунке 16 показаны зависимости отношений одних и тех же K- и L-переходов атомов мишени для разных типов налетающих частиц от атомного номера мишени.

Таблица 9. Сравнение полученных сечений выхода флуоресценции с литературными данными

Линия	Энергия, кэВ	Сечение на пучке Ar 40 МэВ, барн		Сечение на пучке Ar 56 МэВ, барн	
		Наши данные	[15]	Наши данные	[15]
Ta La	8.145	292	547	1008	1741
Ta Lb	9.342	102	148	374	518
Ta Lg	10.893	6.74	21.1	35.9	59.5
Cu Ka	8.047	118	108	425	445
Cu Kb	8.904	9.52	10.7	32.5	48
Nb Ka	16.61		1.79	1.9	4.49

**ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УСКОРЕННЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ С ТОНКИМИ МИШЕНЯМИ**

Таблица 10. Отношения выходов флуоресценции для разных атомных переходов

Элемент	Z	N 14 МэВ	N 19.6 МэВ	Ar 40 МэВ	Ar 56 МэВ	Kr 84 МэВ	Kr 118 МэВ
Отношение La/Lb							
Ta	73	1.59	1.76	2.86	2.70	1.99	
W	74	1.54	1.63	2.92	2.69	0.83	
Pb	82	1.55	1.53	2.19	1.73	5.14	7.48
Отношение La/Lg							
Ta	73	15.25	13.66	43.32	28.08	37.36	
W	74	10.69	11.17	37.17	32.71		
Pb	82	9.93	8.56	14.86	9.87	25.68	
Отношение Ka/Kb							
Ti	22	7.73	7.82	8.57		12.25	
Cr	24	6.53	5.52			7.08	19.42
Cu	29	5.93	5.96	12.39	13.08	6.94	6.29
Ge	32	5.51	5.33	6.80	3.95	7.87	21.57
Nb	41	4.97	3.77			9.00	24.22

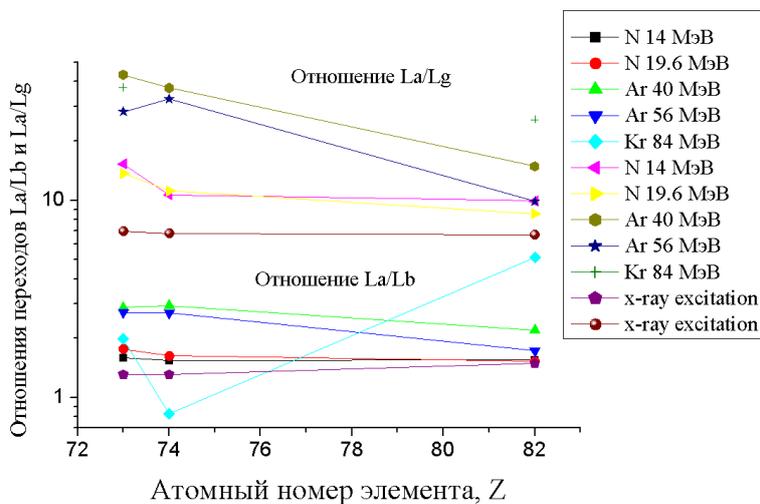


Рисунок 14. Зависимости соотношений переходов La/Lb и La/Lg от атомного номера мишени для разных типов и энергий налетающих частиц

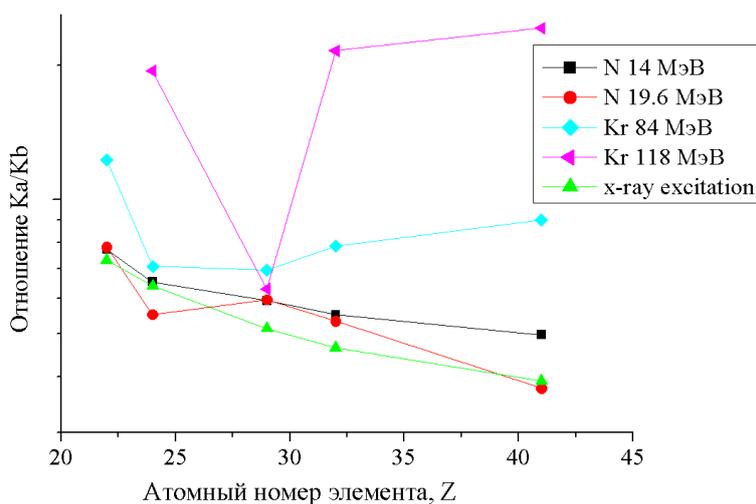
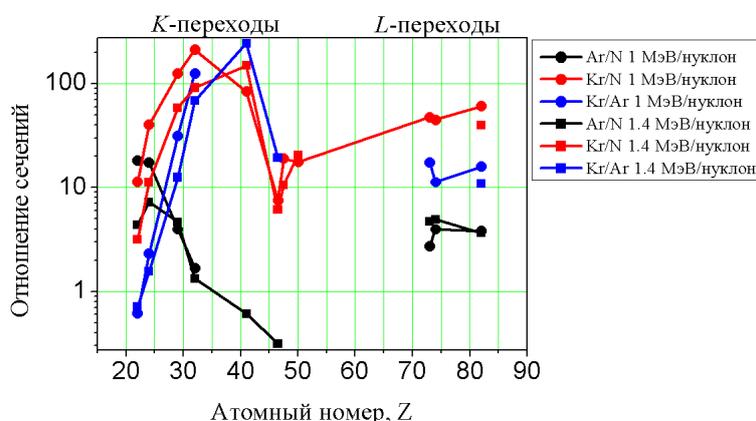


Рисунок 15. Зависимости соотношений переходов Ka/Kb от атомного номера мишени для разных типов и энергий налетающих частиц

**ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УСКОРЕННЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ С ТОНКИМИ МИШЕНЯМИ**

*Таблица 11. Отношения выходов флуоресценции для одних
и тех же атомных переходов для разных энергий и типов налетающих частиц.*

Атомный номер мишени	Энергия первичного пучка 1 МэВ/нуклон			Энергия первичного пучка 1.4 МэВ/нуклон		
	Ar/N	Kr/N	Kr/Ar	Ar/N	Kr/N	Kr/Ar
Отношение K-переходов						
22	18.3	11.4	0.620	4.39	3.16	0.72
24	17.4	40.3	2.32	7.22	11.3	1.56
29	3.97	125.3	31.5	4.65	58.4	12.6
32	1.68	211.2	125.7	1.34	91.1	68.1
41	0	83.6		0.61	148.9	243.3
47	0	7.56		0.31	6.10	19.4
Отношение L-переходов						
47	0	19.0		0	10.6	
50	0	17.6		0	20.6	
73	2.74	47.7	17.4	4.72	0	0
73	3.98	44.9	11.3	4.93	0	0
82	3.82	60.8	15.9	3.65	39.8	10.9



*Рисунок 16. Зависимости отношений K- и L-переходов атомов мишени
для разных типов налетающих частиц от атомного номера мишени*

Одной из особенностей рентгеновских спектров при возбуждении атомов мишени тяжелыми ионами является смещение и уширение характеристических линий в сравнении с аналогичными спектрами, индуцированными первичным рентгеновским или протонным пучком. Рисунки 5 – 10 и таблицы 4 – 6 демонстрируют наличие этого факта. Причиной подобного явления могут служить коллективные эффекты многократной ионизации атомов мишени тяжелыми ионами, описанные в Введении. Однако, как уже отмечалось выше, наблюдаемые до сих пор эффекты многозарядной ионизации [10] происходили при масштабе энергии падающих ионов на порядок выше, используемого в наших экспериментах.

Из сказанного выше следует, что аналитическая применимость рентгеновского анализа с тяжело-ионным возбуждением (PIXE) является достаточно ограниченной и весьма специфичной. Примером эффективного применения тяжелых ускоренных частиц может служить анализ содержания некоторых тяжелых микропримесей в тонких самонесущих пленках, где за счет избирательного возбужде-

ния рентгеновского излучения можно достичь высокой чувствительности анализа. Так в таблице 7 можно увидеть ярко выраженные максимумы сечения выхода флуоресцентных гамма-квантов K_{α} линий для криптона при $Z=41$, а для аргона при $Z=22\div 23$, которые, как отмечалось во Введении, отвечают селективному возбуждению при отличии заряда ядра налетающей частицы от заряда ядра атомов мишени на 4÷5 единиц. В работе [6] указывается, что для наблюдения молекулярного механизма селективного возбуждения требуется высокая степень ионизации падающих ионов. Поскольку в среде равновесная ионизация может значительно отличаться от первоначальной, то мы сделали ее оценки на основании работы [11]. Как показывают наши расчеты степень равновесной ионизации падающих частиц в среде мишеней значительно больше первоначальной ионизации, мало зависит от выбранного диапазона энергий и вещества мишени. Для иллюстрации этого утверждения ниже мы приводим таблицу равновесных зарядов ионов.

**ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УСКОРЕННЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ С ТОНКИМИ МИШЕНЯМИ**

Таблица 12. Зависимость равновесного заряда падающих ионов от атомного состава мишени. Энергия приводится в единицах МэВ/нуклон

Ионы (Энергия)	Атомы мишени									
	²² Ti	²⁴ Cr	²⁹ Cu	³² Ge	⁴¹ Nb	⁴⁷ Ag	⁵⁰ Sn	⁷³ Ta	⁷⁴ W	⁸² Pb
N (1.0)	5.25	5.22	5.17	5.14	5.09	5.07	5.06	5.04	5.04	5.00
N (1.4)	5.51	5.48	5.42	5.39	5.33	5.32	5.31	5.28	5.28	5.25
Ar (1.0)	11.43	11.36	11.24	11.18	11.06	11.03	11.01	10.96	10.96	10.89
Ar (1.4)	12.31	12.25	12.11	12.05	11.92	11.88	11.87	11.81	11.81	11.73
Kr (1.0)	19.28	19.18	18.97	18.87	18.68	18.61	18.59	18.50	18.49	18.38
Kr (1.4)	21.24	21.12	20.89	20.78	20.57	20.49	20.48	20.38	20.37	20.24

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уже предварительные результаты экспериментов по выходу флуоресценции из атомов мишени при бомбардировке их пучками ионов азота, аргона и криптона с энергиями в 1 и 1.4 МэВ/нуклон показывают ожидаемо высокие сечения выходов флуоресценции, демонстрируют селективное возбуждение и могут служить основанием для постановки методик определения элементного состава типа PIXE. Неожиданным оказались проявление эффектов многозарядной ионизации, свойственное механизмам прямой кулоновской ионизации при значительно больших энергиях. Это приводит к сдвигам и уширениям флуоресцентных линий, а так же, по-

видимому, и к высоким фоновым излучениям, мешающим аккуратной обработке этих линий. Последние эффекты, не отраженные в литературе, значительно снижают возможности тяжелоионной PIXE, оставляя лишь отмеченные выше методики, основанные на селективных механизмах ионизации. Кроме того, в экспериментах с пучками азота, как можно видеть из рисунка 6, фон невелик, что позволяет использовать механизмы прямой кулоновской ионизации для возбуждения флуоресценции с сечениями почти на порядок выше протонного возбуждения (рисунки 11 и 12). При этом возможными кандидатами на легкие ионы могут быть углерод, азот и кислород.

ЛИТЕРАТУРА

1. Inner-shell ionization by heavy charged particles / S. Morita, M. Kamiya // Chinese Journal of Physics. – 1977. – Vol. 15. – P. 199–221.
2. Ионизационные эффекты во внутренних электронных оболочках ионизованных атомов. /Г. Щорнак. // ЭЧАЯ – 1984. – Т.14, вып. 4. – С. 835–899.
3. Справочник по ядерной физике /О.Ф. Немец, Ю.В. Гофман, – Киев: Наук. думка, 1975, – 416 с.
4. Production of Carbon Characteristic X Rays by Heavy-Ion Bombardment /R. C. Der [et al] // Phys. Rev. Lett. – 1968. – Vol. 21. – P. 1731–1732.
5. Interpretation of Ar⁺-Ar Collisions at 50 keV /U. Fano and W. Lichten // Phys. Rev. Lett. – 1965. Vol. 14. – P. 627-629.
6. Target Z Dependence of Projectile K_α X-Ray Production Cross Sections in High-Energy, Heavy-Ion-Atom Collisions/ H. Kubo [et al] // Phys. Rev. Lett. – 1973. – Vol. 31. – P. 674-677.
7. Measurements of Inelastic Energy Loss in Single Atomic Collisions of Kr⁺ on Kr at keV Energies and Large Scattering Angles /B. Fastrup and G. Hermann // Phys. Rev. A. – 1971. – Vol. 3. – P. 1955-1958.
8. Radiative Transitions between Quasimolecular Levels During Energetic Atom-Atom Collisions/ F.W. Saris [et al] // Phys. Rev. Lett. – 1972. –Vol. 28. – P. 717-720.
9. X Rays from Superheavy Quasiatoms Transiently Formed during Heavy-Ion—Atom Collisions /P.H. Molker [et al] // Phys. Rev. Lett. – 1972. – Vol. 29. –P. 827-830.
10. Multiple Ionization Effects in X-Ray Emission Induced by Heavy Ions./M. Czarnota [et al] // Brazilian Journal of Physics. – 2006. Vol. 36, issue 2B. – P. 546-549.
11. Ионизация тяжелых ионов и (атомов) продуктов ядерных реакций в различных средах /Н.К. Скобелев// Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 1989. Т. 20, вып. 6. – С. 1439-1478.
12. Commissioning of DC-60 cyclotron of scientific research centre./B.N.Gikal [et al] // XXXV European Cyclotron Progress Meeting. ECPM 2006. Nice, France, November 2-4, 2006. – P. 23.
13. Ion Induced X-Rays/ I.V. Mitchell and J.F. Ziegler // In J. W. Mayer and E. Rimini, Eds, Ion beam handbook for material analysis. New York: Academic Press, 1977.
14. Методы анализа на пучках заряженных частиц/ А.А. Ключников и др.// Киев: Наук. думка, 1987.
15. Implications of Heavy-Ion-Induced Satellite X-Ray Emission II / G.D. O’Kelley [et al] // Nucl. Instr. And Meth. – 1984. – Vol. 31, issue 1-3. – P. 78-97.

**ҮДЕТІЛГЕН АУЫР ИОНДАРДЫҢ ЖҰҚА НЫСАНАЛАРМЕН ӨЗАРА ӘРЕКЕТТЕСКЕН КЕЗІНДЕ
СИПАТТАМАЛЫҚ РЕНТГЕНДІК СӘУЛЕЛЕУДІҢ ҚОЗДЫРУ ҚИМАЛАРЫН ӨЛШЕУ**

Горлачев И., Князев Б., Колобердин М., Лысухин С., Пеньков Ф.

ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

Мақалада энергиясы 1 және 1.4 МэВ/нуклон N, Ar, және Kr үдетілген ауыр иондарының нысаналардың атомдарымен өзара әрекеттескен кезінде рентгендік сәулелеудің K мен L сызықтарының шығу қималарын өлшеудің нәтижелері келтіріледі. Эксперименттерде нысаналар ретінде, органикалық төсенішке шөктірілген, қалыңдығы 200 мкг/см² дейін Cr, Ti, Cu, Ge, Nb, Ag, Sn, W, Ta, Pb пленкалар пайдаланылды. Эксперименттер, Астана қаласында Л.Н. Гумилев атындағы Еуразиялық Ұлттық университет жанында орналасқан, Салааралық ғылыми-зерттеу кешеніндегі ДЦ-60 циклотронында өткізілді.

**X-RAY CROSS-SECTION PRODUCTION MEASUREMENT
AT INTERACTIONS OF ACCELERATED HEAVY IONS WITH THIN TARGETS**

I. Gorlachev, B. Knyazev, M. Koloberdin, S. Lysukhin, F. Penkov

Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty, Kazakhstan

The cross section yield of K and L X-ray, generated with interactions of accelerated heavy ions N, Ar and Kr at energy 1 and 1.4 MeV/nucleon and target atoms are given. The films of Cr, Ti, Cu, Ge, Nb, Ag, Sn, W, Ta, Pb with thickness up to 200 mkg/cm² precipitated on the organic base have been used as targets in the experiments. Experiments were carried out at the cyclotron DC-60 in Astana.

УДК 531.21; 621.039.53

**ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕАКТОРНОЙ ОТРАБОТКИ
СТЕРЖНЕВЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ТВЭЛОВ ДЛЯ РЕАКТОРОВ ЯРД, ЯЭДУ И ЯГДУ**

Дерявко И.И.

Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Представлено обобщение результатов многолетних работ по материаловедческим исследованиям состояния стержневых керамических твэлов после их реакторных испытаний на двигательном режиме (ДР) реактора ядерного ракетного двигателя (ЯРД) или ядерной энерго-двигательной установки (ЯЭДУ), на энергетическом режиме малой мощности (РММ) реактора ЯЭДУ, на энергетическом режиме большой мощности (РБМ) реактора ЯЭДУ и на режиме рабочей мощности (РРМ) реактора ядерной газодинамической установки (ЯГДУ).

ВВЕДЕНИЕ

В реакторах как космических ядерных установок ЯРД и ЯЭДУ, так и наземной ядерной газодинамической установки ЯГДУ предполагается использование одного и того же типа безоболочковых керамических твэлов [1] в форме двухлопастных продольно закрученных (с шагом 30 мм) стержней длиной 100 мм, диаметром описанной окружности 2,2 мм и шириной лопасти 1,24 мм, изготовленных из карбидов и карбидографитов урана, циркония и ниобия (U,Zr,Nb)C, (U,Zr)C+C, (Nb,U)C+C с содержанием урана от 9 до 19 % (мас.) В различных установках эти твэлы (рисунок 1) будут эксплуатироваться в сильно различающихся условиях [2-4].



Рисунок 1. Внешний вид стержневых керамических твэлов реакторов ЯРД, ЯЭДУ и ЯГДУ

В частности, на двигательном режиме установок ЯРД и ЯЭДУ и на энергетическом режиме большой мощности установки ЯЭДУ теплоносителем будет химически активный водород, на энергетическом режиме малой мощности установки ЯЭДУ – инертная ксенон-гелиевая смесь, а на режиме рабочей мощности реактор-лазерной установке ЯГДУ – химически агрессивный азот. При этом максимальная температура эксплуатации твэлов в проточных технологических каналах этих установок на режиме ДР будет достигать примерно 3000 К, на режимах РММ и РБМ – соответственно 1200 и 1300 К, а на режиме РРМ – 2600 К.

Испытания по отработке конструкции и материального состава этих твэлов применительно к различным условиям их эксплуатации в реакторах установок ЯРД, ЯЭДУ и ЯГДУ были проведены в специальных исследовательских реакторах ИВГ.1, ИРГИТ и РА в период с 1975 года по 1998 год (рисунок 2). Одной из главных целей этих испытаний являлось установление качественных и количественных показателей работоспособности стержневых керамических твэлов на каждом из режимов (ДР, РММ, РБМ, РРМ) реакторов указанных установок.

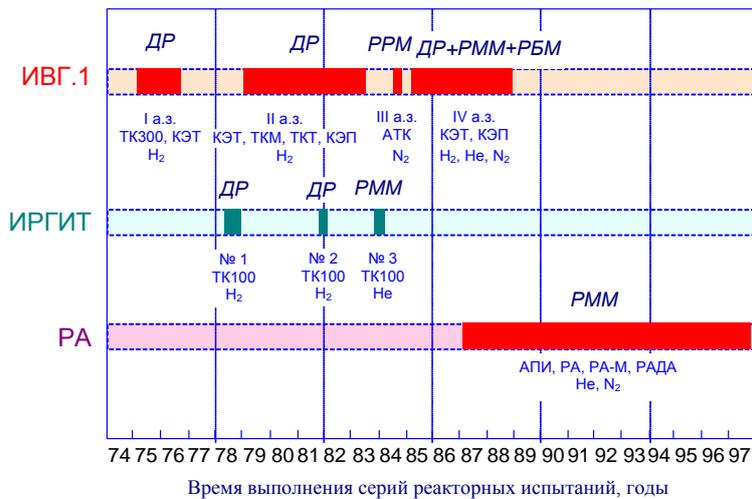


Рисунок 2. Характер и последовательность выполнения испытаний твэлов в реакторах ИВГ.1, ИРГИТ и РА

Для достижения этой цели были осуществлены послереакторные материаловедческие исследования состояния твэлов, испытанных в проточных водородных технологических каналах ТК300, ТКМ, ТКТ, КЭТ и ТК100 реакторов ИВГ.1 и ИРГИТ, проточных азотных технологических каналах КЭТ и АТК реактора ИВГ.1, заглушенных гелиевых технологических каналах ТК100 реактора ИРГИТ и беспроточных гелиевых и азотных ампулах АПИ, РА, РА-М и РАДА реактора РА.

В ходе выполнения этих исследований были получены и обобщены обширные экспериментальные данные о поведении безоболочковых керамических твэлов под облучением в гелии, водороде и азоте, установленные в ходе освидетельствования состояния испытанных твэлов из 136 технологических каналов и 38 ресурсных ампул, а также при исследовании основных параметров у ~16500 твэлов из 61 канала и 29 ампул. Были вскрыты закономерности структурной повреждаемости тугоплавких топливных керамических материалов под влиянием температурного, радиационного, силового, химического и эрозийного воздействия и установлены показатели работоспособности твэлов на каждом из режимов работы реакторных установок ЯРД, ЯЭДУ и ЯГДУ, на основании чего обоснована правильность выбора конструкции и материального состава безоболочковых стержневых керамических твэлов.

В связи с отмеченным рассмотрим полученные результаты установления качественных и количественных показателей работоспособности твэлов последовательно на каждом из режимов работы реакторов ЯРД, ЯЭДУ и ЯГДУ.

ОБОБЩЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТВЭЛОВ НА РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ УСТАНОВОК ЯРД, ЯЭДУ И ЯГДУ

Режим РММ

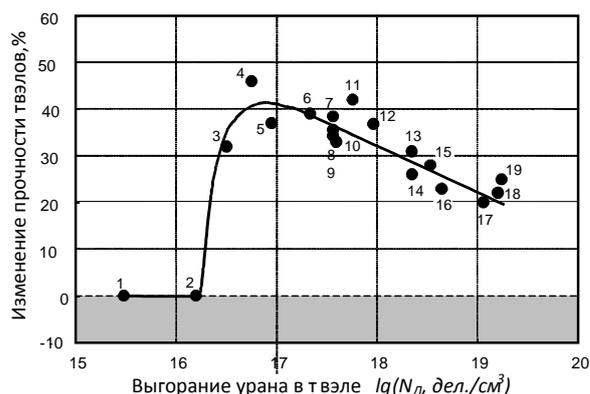
Энергетический режим малой мощности двух- или трехрежимной ЯЭДУ предназначен для непрерывного обеспечения электрической энергией бортового оборудования установки. Условия эксплуатации твэлов на режиме РММ являются достаточно мягкими в сравнении с таковыми на остальных режимах работы реакторов ЯРД, ЯЭДУ и ЯГДУ. Так, например, при максимальной тепловой мощности реактора ~0,5 МВт интенсивность облучения их тепловыми нейтронами составит около 10^{12} см⁻²·с⁻¹. Единственное жесткое условие – это большая (от одного года до трех с половиной лет) длительность непрерывного облучения. Это условие означает, что работоспособность твэлов на режиме РММ практически полностью определяется радиационной стойкостью керамического топливного материала в заданных условиях облучения.

При исследовании радиационной стойкости твэлов в заглушенных каналах реакторов ИРГИТ и беспроточных ампулах реактора РА на режиме

РММ была установлена высокая ресурсная работоспособность твэлов на этом режиме [5-14]. Так, после длительного (~5000 ч) низкоинтенсивного ($\phi_T \sim 1 \cdot 10^{12}$ см⁻²·с⁻¹) облучения в гелиевых каналах ТК100 реактора ИРГИТ и гелиевых ампулах РА и РА-М реактора РА до выгорания урана $\sim 2 \cdot 10^{19}$ дел./см³ при любой температуре $T_{обл}$ в диапазоне от 700 до 1600 К у твэлов сохраняется исходное состояние поверхности и практически полностью отсутствуют поломки, искривления и изменения микроструктуры, отмечаются относительно невысокие радиационные изменения основных параметров – длины, диаметра, объема, массы, периода решетки, электросопротивления, микротвердость, модуля упругости. В частности, изотропное радиационное распухание при $T_{обл} \sim 1200$ К не достигает и 1,5 %. Обнаружен эффект атермического радиационного упрочнения твэлов, появляющийся на ранней стадии облучения (при выгорании $\sim 6 \cdot 10^{16}$ дел./см³), достигающий ~40 % при выгорании $6 \cdot 10^{16}$ дел./см³ и сохраняющийся до конца испытаний (рисунок 3).

Выяснено, что упрочнение твэлов связано с воздействием осколков деления на их структуру и обусловлено временным превалированием процессов залечивания исходных технологических дефектов керамического материала над процессами возникновения радиационных дефектов.

Обнаружен также эффект атермического радиационностимулируемого залечивания намеренно созданных в твэлах поверхностных трещин, повышающий уровень максимального упрочнения топливных стержней до ~100 %. Установлено, что полное залечивание намеренно созданных поверхностных трещин в твэлах достигается после выгорания $\sim 3 \cdot 10^{17}$ дел./см³.



1 – 1 ч; 2 – 5 ч; 3 – 10 ч; 4 – 18 ч; 5 – 29 ч; 6 – 69 ч; 7 – 105 ч; 8 – 105 ч; 9 – 105 ч; 10 – 114 ч; 11 – 157 ч; 12 – 290 ч; 13 – 638 ч; 14 – 645 ч; 15 – 890 ч; 16 – 1157 ч; 17 – 3151 ч; 18 – 4581 ч; 19 – 4803 ч.

Рисунок 3. Характер атермического радиационного упрочнения твэлов, испытанных на режиме РММ

Режим ДР

Условия эксплуатации твэлов на двигательном режиме реактора ЯРД или ЯЭДУ являются самыми жесткими из всех рассматриваемых условий их эксплуатации в реакторах ЯРД, ЯЭДУ и ЯГДУ. Твэлы на режиме ДР будут эксплуатироваться и в реакторе ЯРД, и в реакторах различных конструктивных вариантов двух- и трехрежимных ЯЭДУ в экстремально жестких условиях совместного влияния высокой температуры, термических напряжений, механических нагрузок, реакторного облучения и коррозионно-эрозионного воздействия теплоносителя. Так, например, максимальная мощность реактора ЯРД будет составлять ~300 МВт, ресурс функционирования режима – 3600 с (при этом теплонапряженность твэлов будет находиться на уровне 12 МВт/м²), а количество циклов включения режима (с темпом нагрева и охлаждения твэлов до 400 К/с) – не менее 10.

После реакторными исследованиями твэлов, испытанных на режиме ДР, была выявлена [8, 15-18] недостаточная работоспособность карбидографитовых твэлов в первых двух входных нагревных секциях (НС) каналов КЭТ в условиях полноресурсных (12 пусков общей длительностью ~4000 с) испытаний в реакторе ИВГ.1, что определялось недостаточной их термостойкостью (твэлы этих НС начинают повреждаться трещинами при температуре ниже температуры хрупко-пластического перехода $T_{х-п}$, равной ~1800 К, уже при тепловых потоках порядка 5 МВт/м²). Для сохранения целостности этих твэлов необходимо, как видно из рисунка 4, повысить уровень их термостойкости как минимум вдвое, т.е. до уровня 10-12 МВт/м². В противном случае появление поверхностных трещин в топливных стержнях вызовет снижение их прочности, усиливающееся от пуска к пуску (рисунок 5), до катастрофически низких значений.

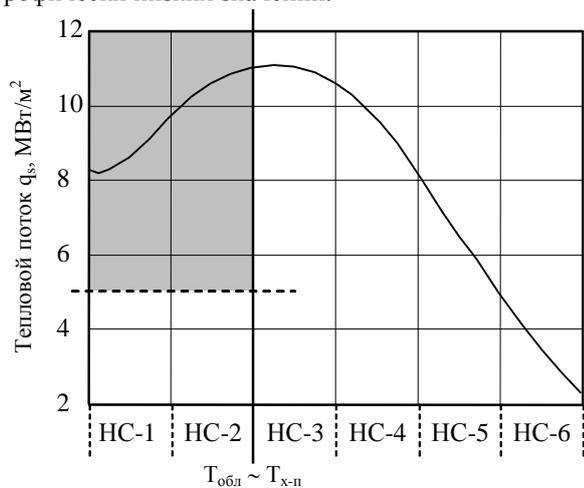


Рисунок 4. Теплонапряженность твэлов по высоте ТВС при эксплуатации на режиме ДР

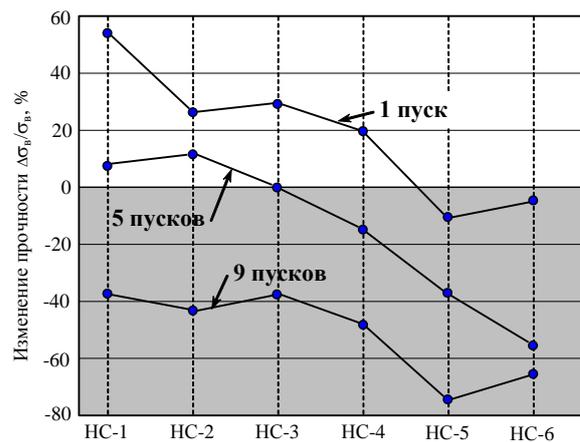


Рисунок 5. Влияние количества пусков на режиме ДР на прочность твэлов

В связи с этим были проанализированы возможности повышения работоспособности твэлов низкотемпературных НС и рекомендовано проведение предварительных упрочняющих обработок твэлов термическими и радиационными способами в сочетании с устранением в них изгибных напряжений, что позволит этим твэлам полностью сохранить работоспособность на двигательном режиме работы реактора ЯРД или ЯЭДУ.

Уточнено также влияние остаточных радиационных макронапряжений на повреждаемость твэлов низкотемпературных НС трещинами. Установлено, что напряжения $\sigma_{ост}^z$ со сжатием на поверхности стержня (и растяжение внутри) оказывают только положительное (упрочняющее) влияние на твэлы, поскольку эти напряжения не способны создать внутренние трещины в твэлах, т.к. их нарастание в твэлах с увеличением дозы облучения прекращается, как видно из рисунка 6, после выгорания порядка $3 \cdot 10^{17}$ дел./см³.

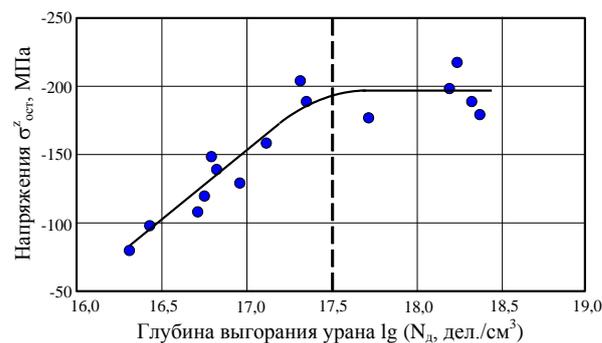


Рисунок 6. Дозовая зависимость нарастания остаточных радиационных напряжений на поверхностях твэлов первой и второй НС при испытаниях на режиме ДР

Режим РБМ

Энергетический режим большой мощности реактора трехрежимной ЯЭДУ предназначен для периодического обеспечения электрической энергией технологического оборудования и спецаппаратуры космической установки. Условия эксплуатации твэлов в реакторе ЯЭДУ на этом режиме по жесткости занимают некоторое промежуточное положение между условиями их эксплуатации на двигательном режиме и на энергетическом режиме малой мощности. При мощности реактора около 35 МВт длительность эксплуатации твэлов в протоке водорода (с суммарным расходом через НС до ~3 кг/с) должна быть не менее 1500 с (~0,4 ч).

Испытания твэлов на режиме РБМ в проточных H_2 -охлаждаемых каналах реактора ИВГ.1 были выполнены с увеличенной до ~51500 с (~14,3 ч) длительностью. Эти испытания твэлов представляли собой заключительную часть их испытаний в реакторе ИВГ.1 на чередующихся режимах, где твэлы прошли сначала пуски на режиме ДР, затем на режиме РММ и только после этого 2 или 7 пусков на режиме РБМ.

По результатам послереакторных исследований была установлена вполне удовлетворительная работоспособность твэлов на режиме РБМ [8, 12, 14, 19, 20]. Показано, что увеличение количества пусков реактора на режиме РБМ с 2 до 7 (увеличение длительности испытаний с ~5 до ~14 ч) вызывает сравнительно небольшое (в среднем на ~20 %) снижение прочности по всей высоте ТВС (см. рисунок 7).

Выявлено более заметное увеличение количества поломок твэлов в выходных НС, чем во входных. Однако это повышение не было опасным, так как твэлы выходных секций разрушались только на крупные фрагменты, а сами фрагменты не смещались относительно друг друга и, следовательно, не приводили к опасному повышению гидравлического сопротивления трактов охлаждения нагретых секций.

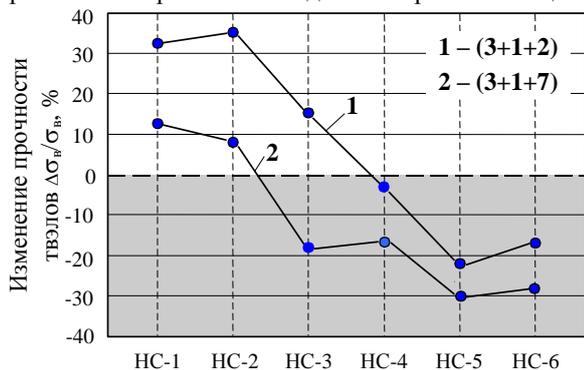


Рисунок 7. Влияние количества пусков реактора ИВГ.1 на энергетическом режиме РБМ на прочность твэлов

Режим РРМ

Условия эксплуатации твэлов на режиме рабочей мощности реактора ЯГДУ представляются весьма жесткими, поскольку теплоносителем является агрессивный по отношению к карбидам азот, а все остальные условия близки к условиям их эксплуатации на двигательном режиме реактора ЯРД или ЯЭДУ; например, мощность реактора ЯГДУ может достигать 130 МВт, при этом суммарный расход азота через НС будет составлять около 45 кг/с, перепад давления теплоносителя по высоте ТВС – примерно 7 МПа, количество циклов включения режима – от 10 до 40, а длительность единичного пуска – от 100 до 500 с.

Для экспериментального доказательства возможности (или невозможности) использования стержневых керамических твэлов в реакторе ЯГДУ без существенного изменения из конструкции и материально состава в 1984 году в реакторе ИВГ.1 были проведены их кратковременные (четыре пуска общей длительностью 670 с) испытания на режиме РРМ в азотных каналах АТК, дополненные в дальнейшем испытаниями в азотных каналах КЭТ, а также испытаниями на радиационно-химическую стойкость в азоте высокого (20 МПа) и невысокого (0,35 МПа) давления в беспроточных ампулах РАДА, РА и РА-М реактора РА.

Послереакторные исследования твэлов азотных каналов АТК и КЭТ, испытанных в реакторе ИВГ.1 на режиме РРМ, показали, что стержневые керамические твэлы обладают в целом достаточной работоспособностью на этом режиме [9, 21-24]. Установлено полное отсутствие повреждений твэлов трещинами при наличии весьма незначительного нитрирования поверхностей твэлов: глубина нитрирования даже у твэлов выходных НС к концу испытаний в протоке азота с расходом 41 кг/с (при температуре 2700 К и давлении 4 МПа) не превышала 10 мкм. Зафиксировано (рисунок 8) некоторое упрочнение твэлов во входных НС (за счет напряжений $\sigma_{ост}^z$) и незначительное разупрочнение в выходных секциях (за счет нитрирования, эрозии и неконгруэнтного испарения материала поверхности).

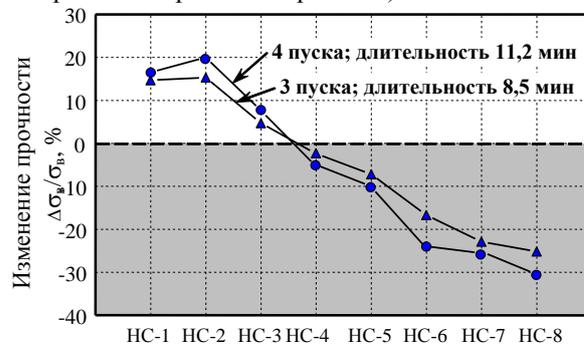


Рисунок 8. Изменение прочности твэлов после их испытаний в реакторе ИВГ.1 на режиме РРМ в проточных азотных каналах АТК

На основании этих результатов и результатов послереакторных исследований состояния твэлов азотных ампул РАДА, РА и РА-М реактора РА [9, 25, 26] был выполнен прогностический анализ поведения твэлов в случае увеличения количества реакторных пусков с 4 до ресурсных 40 и длительности испытаний с 670 с до ресурсных 5000 с. Выяснено, что их прочность может снизиться под влиянием нитрирования, эрозии, испарения, коррозии под напряжением и усталости от вибрационных нагрузок до опасно низкого уровня.

Показано, что при устранении закруток пучков твэлов в НС (например, путем использования противозакруточных устройств) создается благоприятная ситуация, когда принципиальное значение будет иметь только максимальная глубина нитрирования, а она, по расчетным оценкам, к концу полноресурсных испытаний не должна превысить 30 мкм. С учетом всего этого было сделано заключение о воз-

можности использования стержневых керамических твэлов в реакторе установки ЯГДУ без изменения их конструкции и материального состава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Систематизация обширных экспериментальных данных о поведении стержневых керамических твэлов под облучением в гелии, водороде и азоте позволила обосновать правильность выбора конструкции и материального состава таких твэлов для реакторов ЯРД, ЯЭДУ и ЯГДУ: установлена удовлетворительная работоспособность твэлов на режиме ДР, высокая на режиме РММ и вполне достаточная на режимах РБМ и РРМ реакторов этих установок. Полученные обобщения могут быть использованы для прогностических оценок поведения топливных материалов в реакторах других разрабатываемых высокотемпературных ЯЭУ, в которых теплоносителем будет водород, гелий или азот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Материаловедческие исследования стержневых карбидных твэлов ЯРД, ЯЭДУ и ЯВЭУ / И. И. Дерявко [и др.] // Вестник КазГУ, сер. Физическая. – 1999. – № 6. – С. 10–11.
2. Состояние работ в СССР по созданию ЯЭДУ для межпланетных космических полетов / Е. О. Адамов [и др.] // Ядерная энергетика в космосе : тезисы Отрасл. юбил. конф., Обнинск, 15–19 мая 1990. – Обнинск, ФЭИ, 1990. – Т. 1. – С. 11–13.
3. Концепция ЯРД 1992 года / А. И. Горин [и др.] // Ядерная энергетика в космосе. Ядерные ракетные двигатели : тезисы III Отрасл. конф., Семипалатинск-21, 22–26 сент. 1992. – Подольск, НИИ НПО "Луч", 1992. – С. 91–93.
4. Концепция трехрежимной ядерной энергодвигательной установки / А. И. Белогуров [и др.] // 20 лет энергетического пуска реактора ИВГ-1 : материалы Научно-практ. конф., Курчатов, 26–28 апр. 1995. – Курчатов, ИАЭ НЯЦ РК, 1995. – С. 67–68.
5. Радиационная стойкость топливных карбидных материалов при облучении в низкоточном реакторе / И. И. Дерявко [и др.] // ВАНТ, сер. ФРП и РМ. – 1993. – Вып. 1. – С. 90–92.
6. Исследование радиационной стойкости безоболочковых стержневых карбидных твэлов / И. И. Дерявко [и др.] // Ядерная энергетика в Республике Казахстан. Перспективы развития : – тезисы Междунар. научно-практ. конф., Актау 24–27 июня 1996. – Курчатов, ИАЭ НЯЦ РК, 1996. – С. 86.
7. Основные параметры реактора РА и некоторые результаты испытаний твэлов в режиме малой мощности / И. И. Дерявко [и др.] // Ракетно-космические двигатели и энергетические установки / М., ИЦ им. М.В. Келдыша. – 1998. – Вып. 2(147). – С. 128–131.
8. Реакторная обработка стержневых карбидных твэлов ЯРД и ЯЭДУ / И. И. Дерявко [и др.] // Ядерная энергетика в космосе : доклады V Междунар. конф., Подольск, 23–25 марта 1999. – Подольск, НПО "Луч", 1999. – Ч. 2. – С. 539–543.
9. Радиационная и радиационно-химическая стойкость карбидных твэлов в гелии и в азоте / Ю. С. Черепнин [и др.] // Ядерная и радиационная физика : материалы II Междунар. конф., Алматы, 7–10 июня 1999. – Алматы, ИЯФ НЯЦ РК, 1999. – Т. 1. – С. 34–43.
10. Исследование радиационной стойкости стержневых карбидных твэлов в реакторе РА / И. И. Дерявко [и др.] // Вестник НЯЦ РК. – 2000. – Вып. 1. – С. 93–95.
11. Дерявко, И. И. Причины радиационного упрочнения карбидных стержневых твэлов и карбидных безурановых стержней / И. И. Дерявко // Вестник НЯЦ РК. – 2004. – Вып. 3. – С. 81–90.
12. Дерявко, И. И. Работоспособность стержневых керамических твэлов на энергетическом режиме малой мощности реактора ЯЭДУ / И. И. Дерявко // Вестник НЯЦ РК. – 2004. – Вып. 3. – С. 91–99.
13. Дерявко, И. И. Работоспособность твэлов на энергетических режимах реактора ЯЭДУ / И. И. Дерявко // Ядерная энергетика в космосе : доклады Междунар. конф., Москва–Подольск, 1–3 марта 2005. – М., ФГУП НИКИЭТ, 2005. – Докл. №5 (секц. 3).
14. Дерявко, И. И. Послереакторные исследования керамических твэлов, испытанных на энергетических режимах малой и большой мощности реактора ЯЭДУ / И. И. Дерявко // Ядерная и радиационная физика : материалы V Междунар. конф., Алматы, 26–29 сент. 2005. – Алматы, ИЯФ НЯЦ РК, 2006. – Т. 2. – С. 440–447.
15. Исследование причин повреждаемости стержневых карбидных твэлов при ресурсных испытаниях в реакторе ИВГ.1 / И. И. Дерявко [и др.] // Ядерная энергетика в Республике Казахстан. Перспективы развития : тезисы Междунар. научно-практ. конф., Актау, 24–27 июня 1996. – Курчатов, ИАЭ НЯЦ РК, 1996. – С. 88–89.
16. Анализ возможностей повышения функциональной работоспособности твэлов реактора ЯРД / И. И. Дерявко [и др.] // Вестник НЯЦ РК. – 2000. – Вып. 1. – С. 88–92.
17. Рентгенографическое исследование остаточных макронапряжений в безоболочковых стержневых карбидных твэлах / И. И. Дерявко [и др.] // Вестник НЯЦ РК. – 2001. – Вып. 4. – С. 95–100.

18. Дерявко, И. И. Работоспособность стержневых керамических ТВЭлов на двигательном режиме реактора ЯРД или ЯЭДУ / И. И. Дерявко // Вестник НЯЦ РК. – 2004. – Вып. 4. – С. 90–98.
19. Исследование работоспособности стержневых карбидных ТВЭлов на энергетическом режиме большой мощности реактора ЯЭДУ / И. И. Дерявко [и др.] // Вестник НЯЦ РК. – 2000. – Вып. 4. – С. 122–126.
20. Дерявко, И. И. Послереакторные исследования ТВЭлов, испытанных на чередующихся режимах работы реактора ЯЭДУ / И. И. Дерявко, И. Г. Перепелкин, А. Н. Стороженко // Вестник НЯЦ РК. – 2003. – Вып. 4. – С. 102–104.
21. Исследование стержневых карбидных ТВЭлов, облученных в азотоохлаждаемых технологических каналах реактора ИВГ.1 / И. И. Дерявко [и др.] // Ядерная и радиационная физика : материалы III Междунар. конф., Алматы, ИЯФ НЯЦ РК, 2001. – Т. 2. – С. 297–301.
22. Послереакторное исследование ТВЭлов, облученных в азотоохлаждаемых технологических каналах КЭТ / И. И. Дерявко [и др.] // Вестник НЯЦ РК. – 2002. – Вып. – С. 58–61.
23. Исследование керамических ТВЭлов, облученных в технологических каналах АТК реактора ИВГ.1 / И. И. Дерявко [и др.] // Ядерная и радиационная физика : материалы IV Междунар. конф., Алматы, 2003. – Алматы, ИЯФ НЯЦ РК, 2003. – Т. 2. – С. 228–231.
24. Дерявко, И. И. Послереакторные исследования керамических ТВЭлов, испытанных в азотоохлаждаемых технологических каналах АТК / И. И. Дерявко // Вестник НЯЦ РК. – 2004. – Вып. 3. – С. 100–103.
25. Исследование радиационно-химической стойкости стержневых карбидографитовых ТВЭлов в азоте высокого давления / И. И. Дерявко [и др.] // Вестник НЯЦ РК. – 2001. – Вып. 1. – С. 96–103.
26. Дерявко, И. И. Радиационно-химическая стойкость стержневых керамических ТВЭлов в азоте невысокого давления / И. И. Дерявко, И. Г. Перепелкин, А. Н. Стороженко // Вестник НЯЦ РК. – 2003. – Вып. 1. – С. 23–28.

ЯРҚ, ЯЭҚҚ ЖӘНЕ ЯГДҚ РЕАКТОРЛАРЫ ҮШІН СТЕРЖЕНЬДІ КЕРАМИКАЛЫҚ ТВЭЛДЕРДІҢ РЕАКТОРЛЫ ӨНДЕУ НӘТИЖЕЛЕРІН ЖАЛПЫЛАУ

Дерявко И.И.

Қазақстан, Курчатов, ҚР ҰАО Атом энергия институты

Ядролы ракеталы қозғалтқыш (ЯРҚ) реакторының немесе ядролы энерго-қозғалтқыш қондырғышының (ЯЭҚҚ) қозғалтқыш режимінде (ҚР), ЯЭҚҚ реакторының көп қуатты энергетикалық режимінде (КҚР) және ядролы газодинамикалық қондырғы реакторының (ЯГДҚ) көп қуатты режимінде, олардың реакторлы сынауынан кейін стерженьді керамикалық ТВЭлдер жағдайының заттану зерттеулері бойынша көп жылдар нәтижелеріне жалпылау ұсынылды.

GENERALIZATION OF REACTOR RESEARCH RESULTS OF CERAMIC FUEL RODS FOR NRE, NPP AND NGDF REACTORS

I.I. Deryavko

Institute of Atomic Energy NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The paper generalizes the work results of many years on material testing researches of the condition of ceramic fuel rods after in-pile experiments at propulsion mode (PM) of the reactor of the nuclear rocket engine (NRE) or nuclear power propulsion (NPP); at the low-power energy mode (LPM) of the NPP Reactor; at the high-power energy mode (HPM) of the NPP Reactor and at the operating power mode (OPM) of the Reactor of Nuclear Gas-Dynamic Facility (NGDF).

УДК 621.039.572

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
В ОБОСНОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ЗАМЕНЫ ТОПЛИВА РЕАКТОРА ИВГ.1М**

Пахниц В.А., Алейников Ю.В., Попов Ю.А., Прозорова И., Токтаганов М.О.

Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В статье представлены результаты расчетных и экспериментальных исследований в обоснование вариантов замены топлива реактора ИВГ.1М, проведенных в рамках выполнения работ по теме «Разработка и обоснование концепции модернизации активной зоны реактора ИВГ.1М». Представлены результаты расчетов, полученные с целью определения параметров активной зоны реактора ИВГ.1М с топливом пониженного обогащения. Приведены результаты физических исследований по уточнению энергетического распределения нейтронов в месте установки физмакета технологического канала и определению нейтронно-физических характеристик реактора ИВГ.1М с физмакетом технологического канала.

В Казахстане одобрена концепция развития атомной энергетики страны, включающая строительство АЭС. В то же время мировая практика эксплуатации промышленных и экспериментальных ЯЭУ показала, что развитие атомной энергетики возможно только при условии обеспечения высокой степени безопасности этих установок. Обеспечение безопасности атомной энергетики является ключевой проблемой, включающей в себя обоснование и выбор типа ЯЭУ и места строительства АЭС, гарантии качества при производстве ядерного топлива, ТВЭЛов, ТВС, реакторного оборудования и при строительстве АЭС, теоретическое и экспериментальное исследование штатных и аварийных режимов работы реакторных установок и АЭС в целом и многое другое.

Снижение обогащения ядерного топлива исследовательских реакторов является одной из задач по нераспространению ядерно-опасных материалов. В настоящее время в реакторе ИВГ.1М используется топливо с высоким обогащением по ^{235}U (90%). Руководствуясь рекомендациями МАГАТЭ с целью уменьшения риска несанкционированного распространения высокообогащенного урана, проводятся исследования направленные на замену существующей активной зоны (АЗ) реактора ИВГ.1М на АЗ с топливом пониженного обогащения (менее 20 % по ^{235}U).

Возможность перевода реактора ИВГ.1М на топливо пониженного обогащения обосновывается нейтронно-физическими и теплогидравлическими расчетами параметров АЗ с различными конфигурациями топливных сборок и экспериментальными исследованиями [1, 2].

**НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ И
ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ
ХАРАКТЕРИСТИК АЗ С ЦЕЛЬЮ ВЫБОРА ТИПА
ТОПЛИВА С ПОНИЖЕННЫМ ОБОГАЩЕНИЕМ**

Проведению нейтронно-физических расчетов предшествовала верификация программы MCNP5 при расчетах на критичность, которая была проведена путем сравнения результатов расчетов с экспе-

риментальными данными по 6-ти критическим конфигурациям. Отличие между расчетными и экспериментальными значениями эффективного коэффициента размножения составило менее 4 %, что позволяет сделать вывод о корректности расчетов с использованием программы MCNP5 [3-5].

Нейтронно-физические расчеты с использованием программы MCNP5 проводились с целью определения основных нейтронно-физических характеристик АЗ реактора ИВГ.1М: эффективного коэффициента размножения на тепловых нейтронах, плотности потока тепловых нейтронов в экспериментальном канале, распределения энерговыделения по высоте тепловыделяющей сборки (ТВС) и рядом технологических каналов (ТК) и др. Были рассмотрены модели АЗ реактора с топливом пониженного обогащения из дисперсионных сплавов UZr, UMo и диоксида урана.

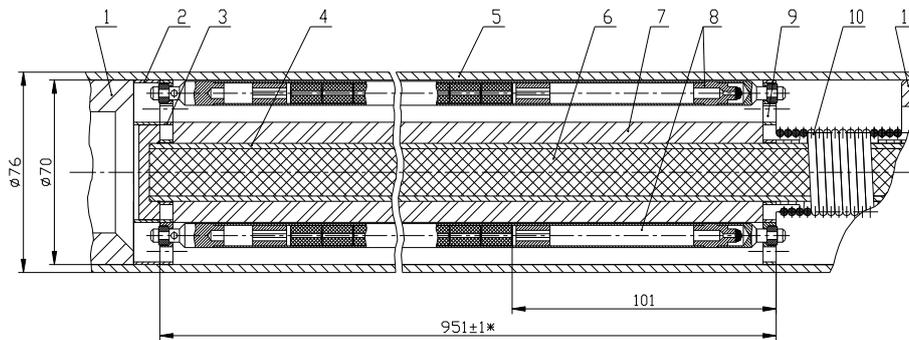
При проведении вариантных расчётов моделей АЗ реактора с использованием дисперсионного сплава UZr изменялась загрузка в АЗ урана с обогащением 20 % по изотопу ^{235}U . По результатам расчетов можно сделать вывод, что снижение обогащения топлива по ^{235}U до 20 % приводит к увеличению загрузки ^{235}U в 1,2 раза и увеличению общей загрузки урана в ~7 раз для сохранения начального запаса реактивности реактора. Это в свою очередь приводит к ухудшению нейтронно-физических параметров реактора, в частности, уменьшению значения плотности потока тепловых нейтронов в экспериментальном канале реактора (ФКЭ).

При проведении вариантных расчётов моделей АЗ реактора с использованием дисперсионного сплава UMo изменялось обогащение топлива до 10, 15 и 20 % по ^{235}U , а также количество ТВЭЛов в трубчатой ТВС типа МР (шести-, пяти- и четырехТВЭЛной модификации). По результатам нейтронно-физических расчетов можно сделать вывод о возможности использования для реактора ИВГ.1М топлива из дисперсионного сплава урана с молибденом (ОМ - 9) с обогащением 19,75 % по ^{235}U . ТВС типа МР шеститвэльной конфигурации с таким топливом

может быть размещена в корпусе канала ВОТК вместо существующих ТВС с топливом из UZr.

Нейтронно-физические расчеты с топливом пониженного обогащения из диоксида урана проводились для вариантов, как со свежим, так и с выгоревшим топливом. Корпус ТК при моделировании представлял собой цилиндр с внутренним диаметром 70 мм и наружным – 76 мм. Элементы ТК были выполнены из тех же материалов, что и ВОТК реак-

тора ИВГ.1М. В ТК размещалась ТВС, которая содержала до 22 твэлов. Схема одной из первых конструкций ТВС представлена на рисунке 1. Изменение начального запаса реактивности было реализовано размещением в центральной части ТВС поглотителя нейтронов из карбида бора с естественным содержанием изотопов бора. Для увеличения значения плотности потока тепловых нейтронов в ТВС был установлен бериллиевый вытеснитель.



1 – втулка биологической защиты, 2 – нижняя опорная решетка, 3 – нижняя решетка, 4 – труба для установки поглотителя нейтронов, 5 – корпус ТК, 6 – поглотитель нейтронов, 7 – бериллиевый вытеснитель, 8 – твэл, 9 – верхняя опорная решетка, 10 – пружина, 11 – втулка упорная

Рисунок 1. Продольный разрез ТК реактора в области АЗ

При проведении первого этапа расчётов рассматривались варианты расчетных моделей с ТВС, содержащих 7, 8 и 9 твэлов без выгорающего поглотителя (ВП) и бериллиевых вытеснителей. При проведении второго этапа расчетов моделировались ТВС с 18, 20 и 22 твэлами высотой 800 мм. В составе каждого ТК присутствовали ВП и бериллиевые вытеснители.

По результатам проведенных расчетов оптимальной является модель АЗ и ТВС с 7 твэлами (без ВП и бериллиевых вытеснителей). Для этого варианта начальный запас реактивности реактора составляет $+8,8 \beta_{эф}$, но значение плотности потока тепловых нейтронов составляет $\sim 12\%$ от ныне существующего значения. Приемлемым с точки зрения сохранения нейтронно-физических параметров реактора представляется вариант модели ТВС с 22 твэлами. Значение запаса реактивности реактора для этой модели составляет $+6,3 \beta_{эф}$. Плотность потока тепловых нейтронов при этом достигает $\sim 60\%$ от существующего ныне значения.

Для расчета критичности реактора с выгоревшим топливом содержание ^{235}U было уменьшено в ТК первого ряда на 1,6 %, в ТК второго ряда – на 1,5 %, в ТК третьего ряда – на 3,7 %. Из результатов расчетов следует, что запас реактивности после длительной работы реактора составляет $+5 \beta_{эф}$.

Для модернизированной ТВС, содержащей диоксидное топливо, были проведены также теплогидравлические расчеты с целью определения изменения температуры по высоте ТК. Расчёты проводились методом теплового баланса. При рас-

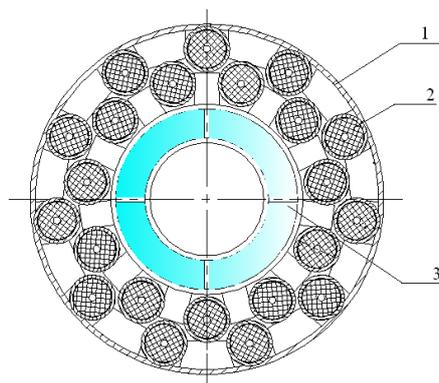
чётах принималось: мощность реактора – 10 МВт, расход воды в одном ТК – 2 кг/с, расход воды в межканальном пространстве реактора – 60 кг/с, температура воды на входе в реактор – 50°C .

Согласно проведенным расчетам температура воды на выходе из реактора не превысит температуру кипения и составит 96, 92 и 87°C соответственно для 1, 2 и 3 ряда ТК.

На основании приведенных выше результатов нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов был сделан выбор в пользу топлива из диоксида урана как наиболее привлекательного для использования в модернизированной АЗ.

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ХАРАКТЕРИСТИК НОВОЙ АЗ ПРИ ЗАМЕНЕ ТОПЛИВА НА ДИОКСИД УРАНА С ОБОГАЩЕНИЕМ 20 % ПО УРАНУ-235

Основным этапом расчетных исследований являлось определение основных характеристик АЗ с низкообогащенным диоксидным топливом, содержащим интегрированный ВП. В рассматриваемом варианте компоновки АЗ моделировались модифицированные твэлы типа ВВЭР с таблетками из диоксида урана обогащением 20 % по ^{235}U . Топливо содержало интегрированный ВП, в качестве которого был выбран гадолиний. Для равномерного размещения топлива в полости ТК 22 твэла были расположены в двух кольцевых рядах. Предполагалось, что все ВОТК реактора ИВГ.1М заменяются на вновь разрабатываемые ТК. Схема расположения твэлов в ТК представлена на рисунке 2. Конструкционные параметры ТК приведены в таблице 1.



1 – корпус ТК, 2 – твэл, 3 – бериллиевый вытеснитель

Рисунок 2. ТК с 22 твэлами и бериллиевым вытеснителем

Таблица 1. Конструкционные параметры ТК

Наименование параметра	Значение параметра
Длина активной части, мм	800
Плотность топлива, г/см ³	10,4
Наружный диаметр топливных таблеток, мм	7,55
Внутренний диаметр топливных таблеток, мм	1,4
Радиус расстановки твэлов, мм	
внутренний ряд	24,0
внешний ряд	30,0
Количество твэлов, шт	
внешний ряд	11
внутренний ряд	11
Масса топлива, г	7913
Масса ²³⁵ U, г	1363
Оболочка твэлов, материал	Э110
Zr	99%
Nb	1%
Плотность оболочек твэлов, г/см ³	6,53
Наружный диаметр оболочек твэлов, мм	9,1
Внутренний диаметр оболочек твэлов, мм	8
Наружный диаметр вставки из бериллия, мм	46
Внутренний диаметр вставки из бериллия, мм	20
Высота вставки из бериллия, мм	800

Вариантные расчеты проводились с целью определения оптимального содержания ВП в топливе для достижения необходимого начального запаса реактивности реактора, а также профилирования поля энерговыделения по рядам ТК. По результатам анализа результатов расчетов оптимальным представляется вариант с содержанием ВП в топливе 0,09 %. Начальный запас реактивности для этого варианта составляет +6,64 β_{эф}. Суммарная эффективность регулирующих барабанов составляет +10 β_{эф}. Плотность потока тепловых нейтронов составляет ~36 % от ныне существующего значения.

Для выбранного варианта модели АЗ определены основные характеристики АЗ с учетом выгорания топлива после длительной работы реактора. Расчет был проведен для варианта с общим выгоранием топлива в АЗ 500 г ²³⁵U. Содержание ²³⁵U в топливе ТК первого ряда уменьшилось на ~10 %, второго ряда на ~9 %, третьего ряда на ~8 %. Неравномерность распределения энерговыделения по радиусу

АЗ достигает 45%, по высоте ТВС – 40%. Результаты расчетов использовались для определения теплогидравлических параметров АЗ, в том числе максимальной мощности ТК и реактора.

На следующем этапе расчетов было определено влияние различных физических процессов (выгорание топлива, образование изотопов плутония, шлакование), сопровождающих работу реактора, на изменение запаса реактивности.

Определены изменения реактивности во времени и глубина выгорания топлива при различных значениях стационарной мощности реактора. Результаты расчетов глубины выгорания топлива представлены в таблице 3.

Изменение запаса реактивности во время работы реактора на различных уровнях стационарной мощности представлено на рисунке 3.

Таблица 3. Результаты расчетов нейтронно-физических параметров реактора ИВГ.1М

Мощность, МВт	Время работы, ч	Глубина выгорания, МВт-сут/ кг
10	10148	22,57
20	5500	38,54
30	3700	54,65

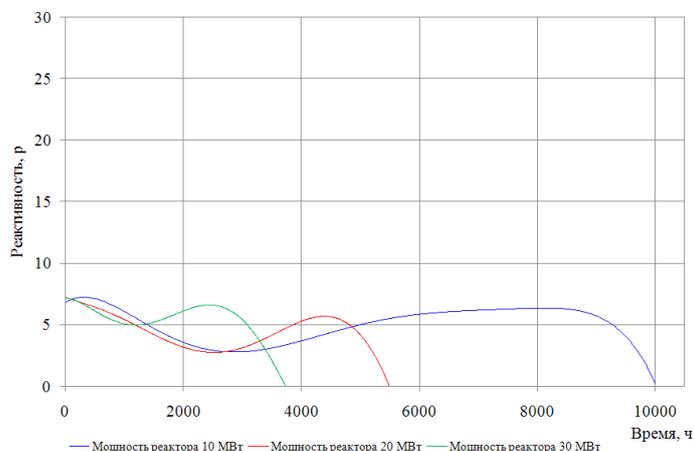


Рисунок 3. Изменение реактивности во время работы реактора на различных уровнях стационарной мощности

Изменения реактивности во время длительной работы реактора обусловлено выгоранием ^{235}U и ВП нейтронов, образованием изотопов плутония и накоплением шлаков. Активно захватывающие нейтроны изотопы гадолиния ^{155}Gd и ^{157}Gd в реакторе "выгорают" и превращаются в соседние ядра ^{156}Gd и ^{158}Gd , у которых сечение захвата на порядок меньше. Потери реактивности компенсируются выгоранием сильнопоглощающих ядер гадолиния, вследствие чего реактивность незначительно изменяется в течение времени. Количество накопленных изотопов плутония составляет ~1 % от общей доли делящихся нуклидов за все время длительной работы реактора. На рисунке 4 приведены кривые выгорания ^{235}U и накопления изотопов Pu для уровня мощности реактора 30 МВт. На рисунке 5 приведены

кривые накопления первой группы шлаков ($^{149}\text{Sm}_{62}$, $^{157}\text{Gd}_{64}$, $^{155}\text{Eu}_{63}$, $^{151}\text{Sm}_{62}$ и $^{113}\text{Cd}_{48}$) при работе реактора на стационарном уровне мощности 30 МВт.

Количество накопившихся шлаков первой группы составляет для $^{149}\text{Sm}_{62} \sim 0,06$ г/кг ^{235}U , для $^{157}\text{Gd}_{64} \sim 0,0003$ г/кг ^{235}U , для $^{155}\text{Eu}_{63} \sim 0,009$ г/кг ^{235}U , для $^{151}\text{Sm}_{62} \sim 0,19$ г/кг ^{235}U , для $^{113}\text{Cd}_{48} \sim 0,01$ г/кг ^{235}U за все время работы.

Расчетным путем был исследован эффект извлечения ТК из АЗ. Для варианта компоновки АЗ, при котором один ТК был извлечен из ячейки первого ряда и установлен вместо ФКЭ в центральную ячейку, запас реактивности незначительно увеличивается (на $\sim 0,2 \beta_{эф}$) по сравнению с исходным вариантом компоновки АЗ.

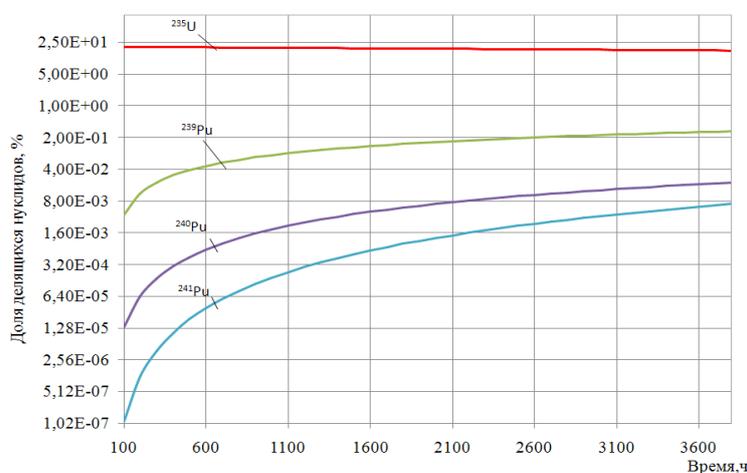


Рисунок 4. Кривые выгорания ^{235}U и накопления изотопов Pu на стационарной мощности 30 МВт

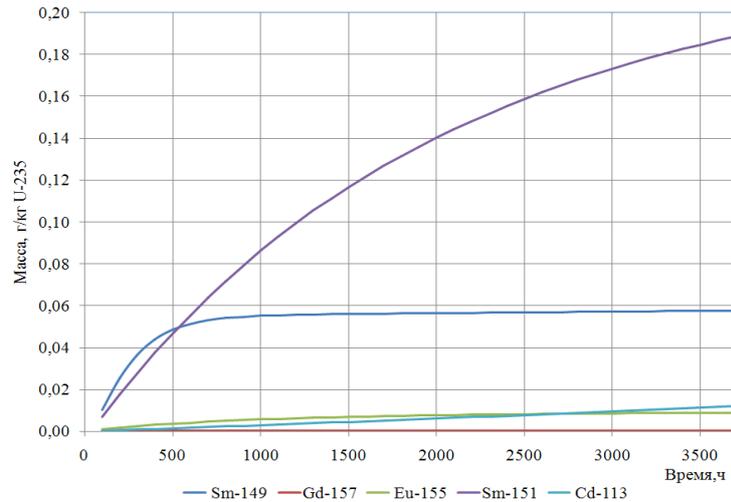


Рисунок 5. Кривые накопления первой группы шлаков при работе реактора на стационарной мощности 30 МВт

Для варианта компоновки АЗ, при котором один ТК был извлечен из ячейки первого ряда, а в центральной сборке установлен ФКЭ реактивность уменьшается на $\sim 2 \beta_{эф}$ по сравнению с исходным вариантом компоновки.

Для обоих вариантов компоновки АЗ с извлеченным ТК Φ_T приблизительно в 2 раза меньше, чем в исходном варианте.

В данной работе был исследован так же эффект осушения одного ТК АЗ целиком. По результатам проведенных расчетов установлено, что обезвоживание одного ТК в первом ряду каналов приводит к уменьшению запаса реактивности на $0,8 \beta_{эф}$, а обезвоживание всей АЗ приводит к уменьшению запаса реактивности на $27,5 \beta_{эф}$.

На основании проведенных теплогидравлических расчетов параметров ТК с топливом пониженного обогащения реактора ИВГ.1М определено, что максимальная мощность может составлять 45 МВт, при условии ограничения максимальной температуры топлива 2375°C и суммарном расходе охлаждающей воды через реактор 380 кг/с. Однако существующая система охлаждения не может обеспечить требуемое давление на входе в тракты охлаждения реактора 2,76 МПа при максимально-допустимом в настоящее время 1,32 МПа. На рисунке 6 приведено расчетное распределение температуры конструктивных элементов технологического канала по высоте активной зоны реактора для самого теплонапряженного третьего ряда ТК при мощности реактора 45 МВт.

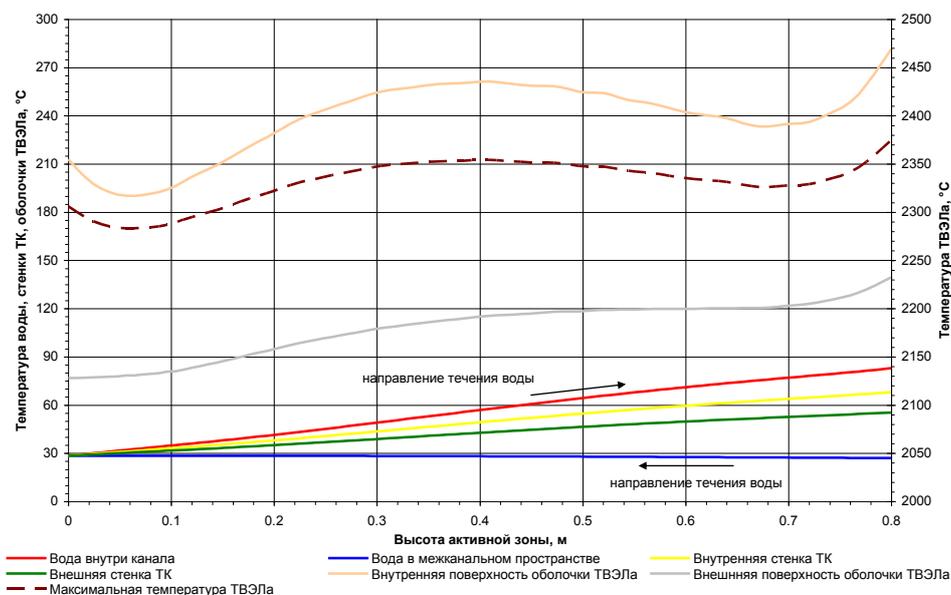


Рисунок 6. Изменение температуры воды, стенки ТК и твэла по высоте АЗ для третьего ряда каналов при мощности реактора 45 МВт

Существующая в настоящее время система подачи воды обеспечивает суммарный расход воды через тракты охлаждения реактора равный 200 кг/с с давлением в напорном коллекторе 1,32 МПа. При такой системе подачи воды максимальная мощность реактора не может быть выше 30 МВт. С целью увеличения мощности реактора предлагается снизить расход воды через отверстия в бериллиевых вытеснителях. В этом случае максимальная мощность реактора составит 37 МВт при суммарном расходе охлаждающей воды через реактор 200 кг/с.

ИССЛЕДОВАНИЯ С ФИЗИЧЕСКИМ МАКЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАНАЛА С ДИОКСИДНЫМ ТОПЛИВОМ В РЕАКТОРЕ ИВГ.1М

Целью исследований являлось определение нейтронно-физических и теплофизических характеристик системы «физмакет ТК - реактор ИВГ.1М» и уточнение энергетического распределения нейтронов в месте установки физмакета ТК (ФМ).

Физические исследования осуществлялись на физическом уровне мощности реактора в 3 этапа.

На первом этапе исследований проводилось определение характеристик нейтронного поля в «пустом» ФКЭ. Эксперимент проводился с использованием активационных индикаторов (АИ), установленных в ФКЭ на медной проволоке диаметром 1 мм.

Для определения характеристик нейтронного поля использовались наборы АИ, перекрывающих энергетический диапазон нейтронов от 0,025 эВ до 14 МэВ. Медная проволока также использовалась в качестве АИ для измерения распределения тепловых нейтронов по высоте ФКЭ.

Исследования на втором и третьем этапе проводились с использованием ФМ ТК. В одном из экспериментов вода в корпусе ФМ ТК отсутствовала. Модельная ТВС в обоих экспериментах представля-

ла собой однорядную сборку из 7 твэлов и размещалась в корпусе ФМ ТК. Один из семи твэлов был измерительным твэлом, оснащенный топливными таблетками, калиброванными на содержание ^{235}U .

Оболочка твэлов была изготовлена из циркониевого сплава Э110. Активная часть твэла состояла из 85 топливных таблеток типа БН-350 с обогащением 17% по изотопу ^{235}U . Для определения пространственного распределения плотности потока тепловых нейтронов использовались проволочные индикаторы из меди. Для абсолютных измерений распределения плотности потока быстрых нейтронов [6] использовались АИ из индия в виде фольг, которые были установлены на расстояниях ± 300 , ± 200 , ± 100 , 0 мм от центра активной части ТВС на радиусе 20 мм. Перед установкой индикаторов в ФКЭ они были помещены в кадмиевые экраны толщиной от 0,5 до 1 мм. Внешний вид ТВС и корпуса ФМ ТК, снаряженного АИ, представлены на рисунке 7.

Погрешность в определении плотности потока составила: 10 % для тепловых нейтронов, 15 % для надтепловых нейтронов и 25 % для быстрых нейтронов (при доверительной вероятности 95 %).

Восстановление спектра нейтронов заключалось в сопряжении энергетических областей тепловых, надтепловых и быстрых нейтронов. На рисунке 8 для иллюстрации представлен спектр нейтронов в диапазоне от 10^{-8} до 13 МэВ в ФКЭ реактора ИВГ.1М на мощности 10 кВт.

Спектры быстрых нейтронов, измеренные с помощью АИ в экспериментальном канале реактора ИВГ.1М на уровне центра активной зоны при проведении экспериментов приведены на рисунке 9. Значения плотности потока быстрых нейтронов приведены к мощности реактора 1 кВт.



Рисунок 7. Внешний вид ТВС и корпуса ФМ ТК

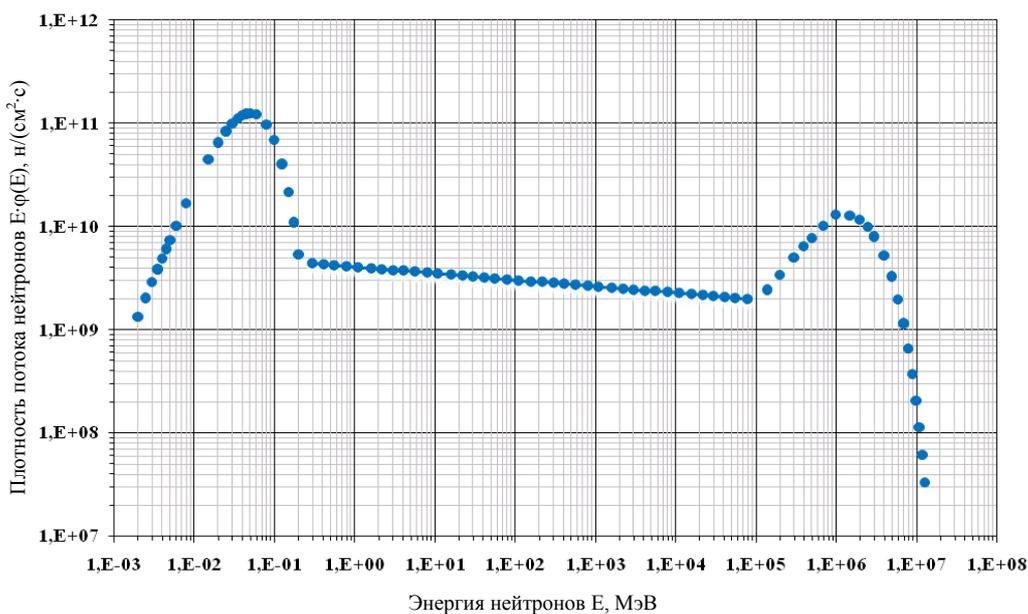


Рисунок 8. Спектр нейтронов в ФКЭ реактора ИВГ.1М. Мощность реактора 10 кВт

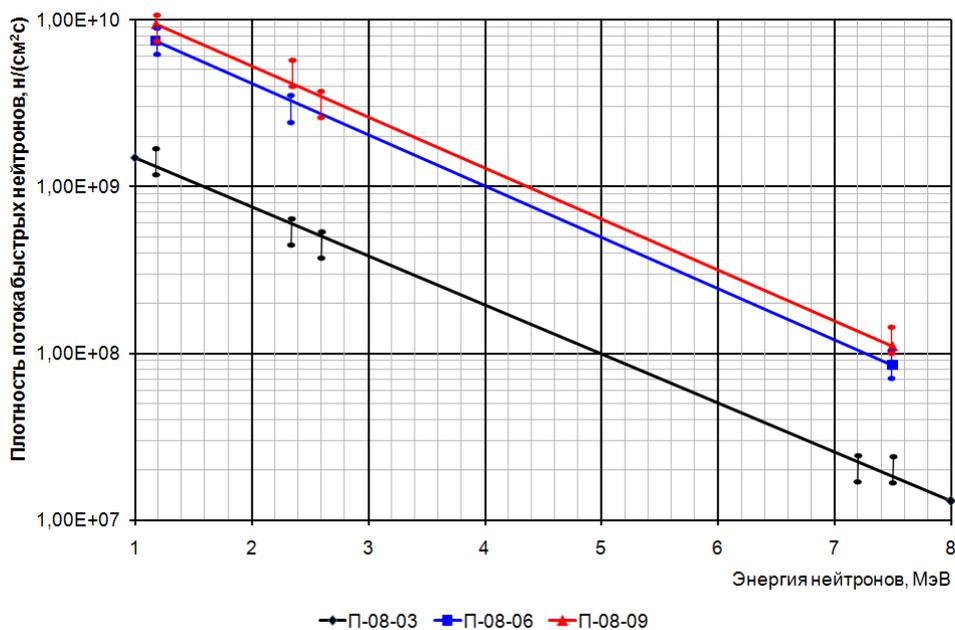


Рисунок 15. Интегральный спектр быстрых нейтронов в ФКЭ (мощность реактора $P = 1$ кВт)

В результате физисследований определены так же высотное и радиальные распределения плотности потока тепловых нейтронов, полученные при помощи проволочных индикаторов.

Эксперименты с ФМ ТК позволили определить основные нейтронно-физические характеристики системы «ФМ ТК – реактор ИВГ.1М»:

- Значение плотности потока тепловых нейтронов на наружной поверхности твэлов ТВС ФМ ТК при мощности реактора 1 кВт составило $\sim 1,1 \cdot 10^{10}$ нейтр/(см²·с), что в 2,1 раза меньше значения плотности потока тепловых нейтронов в пустом

ФКЭ при той же мощности реактора. Плотность потока надтепловых нейтронов увеличилась в 1,5 раза по сравнению с пустым ФКЭ. Интегральное значение плотности потока быстрых нейтронов с энергией свыше 1,15 МэВ не превышает $9 \cdot 10^9$ нейтр/(см²·с) что в ~ 6 раз больше соответствующего значения в пустом ФКЭ. Различие спектров нейтронов в ФМ ТК и пустом ФКЭ связано с поглощением тепловых нейтронов в топливе ФМ ТК.

- Значения коэффициента неравномерности распределения тепловых и надтепловых нейтронов в месте установки ФМ ТК составили 1,7 и 1,15 по вы-

соте и по радиусу соответственно. Определено высотное распределение быстрых нейтронов с энергией более 1,15 МэВ. Значение коэффициента неравномерности распределения быстрых нейтронов по высоте составило 1,7.

- Слив воды из ФМ ТК, установленного в ФКЭ привёл к увеличению энерговыделения в топливе ТВС на ~ 15 % и увеличению запаса реактивности системы «реактор – ФМ ТК» на $2 \beta_{эф}$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выбор наиболее приемлемого варианта АЗ и ТК с топливом пониженного обогащения сделан с учетом необходимости сохранения характеристик существующей АЗ реактора ИВГ.1М. Принималось во внимание то обстоятельство, что объем доработки конструкции реактора при его комплектации указанным вариантом АЗ должен быть минимальным, а форма и геометрические размеры наружной поверхности ТК для новой АЗ должны быть аналогичны этим параметрам наружной поверхности ВОТК. Принимался во внимание и фактор доступности нового топлива, в том числе и возможность его изготовления на предприятиях РК. Однако, сделанный выбор не исключает продолжение поиска других эффективных путей модернизации АЗ реактора ИВГ.1М. Одним из возможных направлений поиска может являться вариант модернизации АЗ реактора с применением керметных твэлов на основе микро-топлива с матричной структурой ($UO_2 - ZrNb$).

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Реактор ИВГ.1М: Техническое описание: АК.65000.00.195ТО. - Инв. № К-593. - 1989.
- 2 Физический пуск реактора ИВГ.1: Отчет о НИР (промежуточный) / НПО «ЛУЧ»; Павшук В.А. - Семипалатинск-21, 1972.- Инв. № К-5671.
- 3 Briesmeister, J.F. MCNP - a general Monte-Carlo Code for neutron and photon Transport, Los Alamos National Laboratory report LA-7396M. - 1997.
- 4 MacFarlane, R.E. The NJOY Nuclear Data Processing System, Version 91, Los Alamos National Laboratory report LA-12740M / MacFarlane, R. E., and Muir, D. W./ - 1994.
- 5 MacFarlane, R. E. The NJOY Nuclear Data Processing System, Volume I: User's Manual, Los Alamos National Laboratory report LA-9303-M, Volume I, II (ENDF-324) /MacFarlane, R. E., Muir, D. W., Voicourt, R. M./ - 1982.
- 6 Метрология нейтронных измерений на ядерно-физических установках. Материалы I всесоюзной школы. Т. 1 и 2. Под ред. [Р.Д. Васильева]. М., 1976. с.176.

ИВГ.1М РЕАКТОР ОТЫНЫН АУЫСТЫРУ НҰСҚАУЛАРЫН НЕГІЗДЕУДЕ ЕСЕП АЙЫРАТЫН-ЭКСПЕРИМЕНТАЛДЫ ЗЕРТТЕУ

Пахниц В.А., Алейников Ю.В., Попов Ю.А., Прозорова И., Токтаганов М.О.

ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан

Жұмыстарды орындау рамкасында өткізілген «ИВГ.1М реакторын белсенді белдеуін жаңарту тұжырымдамасын негіздеу және әзірлеу» тақырыбы бойынша, мақалада ИВГ.1М реактор отынын ауыстыру нұсқаларын негіздеуде есеп айыратын және эксперименталды нәтижелері ұсынылды. Төмен байытылған отынмен ИВГ.1М ректорын белсенді белдеу параметрларын анықтау мақсатымен алынған, есеп нәтижелері ұсынылған. Технологиялық канал физ макетімен ИВГ.1М реакторын нейтронды-физикалық сипаттамаларын анықтау және технологиялық канал физ макетін қондыру орнында нейтрондарды энергетикалық таратуын анықтау бойынша физикалық зерттеулер нәтижелері келтірілді.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в результате экспериментов данные позволили провести верификацию расчетной методики. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало их хорошую сходимость (в пределах 5 %), что показывает корректность использованной расчетной модели.

На основании проведенных расчетов по определению нейтронно-физических характеристик реактора ИВГ.1М подтверждена принципиальная возможность его модернизации путем замены UZr-топлива с обогащением 90 % по ^{235}U на диоксидное топливо с пониженным обогащением, которое может быть произведено на предприятиях Республики Казахстан.

В результате проведенных исследований с ФМ ТК получены экспериментальные данные об основных нейтронно-физических параметрах системы «ФМ ТК - реактор ИВГ.1М».

Показано, что при модернизации АЗ реактора ИВГ.1М наиболее приемлемым представляется вариант компоновки АЗ с диоксидным топливом пониженного обогащения, содержащим интегрированный ВП. В рассматриваемом варианте предполагается использовать твэлы, содержащие таблетки из диоксида урана обогащением 20 % по ^{235}U и ВП, в качестве которого предполагается использовать гадолиний. Выбранный вариант АЗ обеспечивает плотность потока тепловых нейтронов в петлевом канале до $2,6 \cdot 10^{14}$ нейтр/(см²·с) при максимальной тепловой мощности в 37 МВт.

**EXPERIMENT –CALCULATED RESEARCHES TO SUBSTANTIATE
OPTIONS OF IVG.1M REACTOR FUEL REPLACEMENT**

V.A. Pakhnits, Y.V. Aleinikov, Y.A. Popov, I.V. Prozorova, M.O. Toktaganov

Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The article issues outcomes of experiment-and-calculated researches to substantiate the options of IVG.1M reactor fuel replacement performed within the activities framework “Development and substantiation of the concept of IVG.1M reactor core updating”. There are calculation results obtained in order to characterize IVG.1M reactor core with low-enriched fuel. Current article presents results of physical researches have been performed to specify neutron energy distribution in place of installation of process channel mockup and to identify neutronic characteristics of IVG.1M reactor with mockup of process channel.

УДК 621.039.53.536

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИ УДЕРЖАНИИ РАСПЛАВА КОРИУМА В КОРПУСЕ РЕАКТОРА (INVECOR)

Бакланов В.В., Жданов В.С., Малышева Е.В.

Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Описан проект МНТЦ, посвященный экспериментальному исследованию процессов в бассейне прототипного кориума при удержании расплава активной зоны в корпусе реактора с водой под давлением. Планируется выполнение крупномасштабных экспериментов с моделями корпуса в масштабе 1:12 и 60 кг предварительно расплавленного кориума. Для выполнения экспериментов применяется установка с индукционным нагревом "ЛАВА-Б" и устройством для моделирования остаточного тепловыделения на основе коаксиальных плазматронов общей мощностью до 90 кг. Предварительные эксперименты подтвердили возможность выполнения экспериментов в течение более 2 часов при охлаждении внешней поверхности модели корпуса непрерывным потоком воды. Найдены оригинальные технические решения для защиты компонентов кориума от карбидизации и для создания условий для физико-химического взаимодействия "кориум/сталь" за счет применения профилированного теплоизоляционного пакета на внешней поверхности модели корпуса. Разработан проект экспериментального устройства, выполнены предварительные расчеты, проведены поддерживающие эксперименты в обоснование работоспособности отдельных узлов и систем экспериментальной установки.

Общей целью проекта является улучшение обоснования безопасного удержания расплава в корпусе легководного реактора в условиях тяжелой аварии. Указанная цель будет достигнута экспериментальным моделированием тепловых и физико-химических процессов при удержании бассейна расплава прототипного кориума на днище водоохлаждаемого корпуса реактора.

В практике исследования внутрикорпусного удержания достаточно полно изучены тепло-гидравлические процессы на модельных расплавах. Физико-химические процессы в бассейне расплава исследованы в программах RASPLAV и MASCA в маломасштабных экспериментах и в некоторых крупномасштабных опытах. Физико-химические процессы взаимодействия кориума с корпусной сталью исследованы только в маломасштабных 1-D экспериментах по проекту МНТЦ METCOR.

В Проекте планируется одновременно исследовать совокупность тепловых и физико-химических процессов при удержании расплава реального кориума в крупномасштабной модели днища силового корпуса реактора типа ВВЭР.

Для выполнения экспериментов используется установка ЛАВА-Б. Установка оснащена индукционной печью для получения расплава прототипного кориума и устройством приема сливаемого расплава, содержащего водоохлаждаемую модель днища силового корпуса реактора, устройство для имитации остаточного тепловыделения плазматронного типа и набор датчиков температуры, давления и деформации. Для подготовки крупномасштабных опытов и оптимизации инженерно - технологических решений будут выполнены поддерживающие эксперименты на маломасштабном стенде.

Основными результатами Проекта будут являться новые экспериментальные данные по финальной структуре бассейна кориума с естественной конвекцией при имитации остаточного тепловыделения в топливе и абляции модели днища корпуса при различных составах расплава и тепловых нагрузках на стенку в 2-D конфигурации с реальной кривизной днища силового корпуса реактора.

Полученные результаты будут использованы для разработки моделей, описывающих поведение расплава на внутрикорпусной фазе аварии, верификации расчетных кодов для обоснования концепции IVR для имеющихся и вновь разрабатываемых проектов. Технологические концепции, применяемые при выполнении экспериментов, могут быть использованы исследователями для решения аналогичных задач.

В проекте предусматривается выполнение 4 задач:

1. Модернизация установок и оптимизация технологии плавки и имитации остаточного тепловыделения, включая 3 крупномасштабных эксперимента;
2. Расчетное сопровождение экспериментов, включающие пре-тест расчеты режимов ЭПП и режимов работы имитатора остаточного тепловыделения и пост-тест расчеты;
3. Пост-тест анализ результатов экспериментов, включающий в себя исследование результатов взаимодействия кориума со сталью, изучение состава и свойств продуктов взаимодействия, составление базы данных INVECOR.

Зарубежные коллабораторы проекта:

- Комиссариат по атомной энергии Франции (организации в Саклае и Кадараше);
- Исследовательский центр в Карлсруэ (Германия);
- Исследовательский центр в Дрездене (Росендорф) (Германия);

- Институт трансурановых элементов в Карлсруэ (Германия);
- Университет в Пизе (Италия).

ВВЕДЕНИЕ

Концепция локализации расплава в корпусе реактора, состоит в удержании расплава кориума на днище при пассивном охлаждении наружной поверхности корпуса с обеспечением докритического режима кипения охлаждающей воды. Несмотря на перспективность и кажущуюся простоту этого технического решения, оно имеет ограниченное применение в связи с тем, что для надежного обоснования бескризисного кипения охлаждающей воды на наружной поверхности корпуса требуется иметь большой запас плотности теплового потока до критического значения ($k \geq 2$). Такой гарантированный запас удается обеспечить при удержании расплава кориума в корпусе реакторов средней мощности. В реакторах большой мощности ($N_{эл} > 1000$ МВт) и других, не оснащенных системой удержания расплава в корпусе, взаимодействие кориума с неохлаждаемой снаружи стенкой корпуса может привести к выходу расплава в шахту реактора. Ключевыми вопросами исследования процессов на внутрикорпусной стадии аварии являются:

- Структура стратифицированного бассейна расплава и ее изменение во времени.
- Распределение компонентов расплава и продуктов деления между жидкими слоями и между расплавом и закристаллизовавшимся веществом (также в динамике).
- Физико-химические аспекты и кинетика взаимодействия кориума с материалом корпуса.
- Тепло-гидродинамика бассейна расплава, условия теплообмена на внутренней и наружной поверхностях корпуса и между стратифицированными слоями, в том числе при наличии корки между жидкостями и на ограничивающих поверхностях.
- Напряженно-деформированное состояние корпуса при комплексном воздействии термических, химических и механических нагрузок.
- Характер повреждения неохлаждаемого корпуса и условия поступления кориума в шахту реактора.

Экспериментальные исследования по проблеме удержания расплава кориума в корпусе реактора проводились и проводятся для снижения имеющихся расчетных неопределенностей при описании взаимодействия стратифицированного бассейна расплава кориума с водоохлаждаемым корпусом реактора. Эти исследования проводятся в двух основных направлениях:

- критические тепловые потоки на охлаждаемой наружной поверхности корпуса реактора,

- тепло-гидродинамические и физико-химические процессы в бассейне кориума во внутрикорпусных условиях.

В настоящее время имеется обширная экспериментальная база данных по критическим тепловым потокам на наружной поверхности корпуса по результатам исследований: на модели полуэллиптического днища корпуса ВВЭР-640 [1]; на установках ULPU-2000 [2]; SYBL [3]; "Бак" [4]; "Петля" [5]; SULTAN [6].

Большой объем исследований по теплогидродинамике бассейна расплава выполнен на установках СОРО и СОРО II [7], BALI [8], SIMECO [9], RASPLAV-salt [10], в которых в качестве имитатора расплава применяли воду, различные органические жидкости, расплавы солей и легкоплавких металлов для создания стратифицированной структуры бассейна.

Решение подобной задачи предусмотрено в серии экспериментов с полусферической моделью днища силового корпуса на установке LIVE, в которых в качестве имитатора реакторного топлива применяются расплавы солей и (на конечной стадии программы) окись ванадия, а остаточное тепловыделение моделируется омическим нагревателем.

Основные результаты экспериментальных исследований, полученных на расплавах имитаторов:

- достигнуто удовлетворительное моделирование тепло-гидродинамики бассейна расплава в условиях ее внутрикорпусного удержания,
- разработанные модели адекватно описывают свободную конвекцию тепловыделяющей жидкости, фокусирующий эффект стального слоя на поверхности бассейна и локальные тепловые нагрузки на стенку корпуса реактора,
- расчетные неопределенности при описании тепло-гидродинамических процессов во многом связаны с корректностью задания теплофизических свойств расплавов.

Напряженно-деформированное состояние корпуса при одновременном действии механических нагрузок (от избыточного давления и веса) и термических нагрузок от расплава экспериментально исследовали во многих работах, к числу недавних относятся эксперименты LHF [11], RUP THER [12] и на установке FOREVER [13].

1. ПРЕДПОСЫЛКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

Следует отметить, что основная задача обоснования удержания кориума в корпусе реактора может быть сформулирована как доказательство целостности его стенки при совместном действии на нее механических, термических и физико-химических нагрузок. Представленные выше исследования, выполненные на имитаторах, не учитывают некоторые важные особенности процессов при удержании расплава топлива в корпусе реактора:

- существенно более высокую температуру расплава,
- особые свойства расплава, в частности, характер фазовой диаграммы, характерные температурные зависимости плотности и вязкости,
- физико-химические взаимодействия между стратифицированными слоями бассейна расплава и между расплавом и корпусной сталью,
- эволюцию кислородного потенциала расплава и влияние этого параметра на характеристики процессов.

Эти особенности могут быть учтены лишь на основе экспериментов с прототипными в физико-химическом смысле расплавами. К числу таковых следует отнести исследования по программам OECD RASPLAV [14] и MASCA и по проекту МНТЦ METCOR.

Главными целями программы OECD РАСПЛАВ [14] были:

- изучение поведения расплава прототипного кориума в крупномасштабных экспериментах и получение экспериментальных данных по взаимодействию расплава с корпусом реактора,
- изучение локальных процессов в поддерживающих маломасштабных опытах,
- разработка расчетных моделей, описывающих процессы при взаимодействии на основе полученных экспериментальных данных.

Для проведения крупномасштабных экспериментов в РНЦ КИ была создана установка, в которой реализован метод косвенного нагрева кориума от боковых плоских индукционно обогреваемых графитовых нагревателей. По программе «Расплав» было проведено 4 крупномасштабных эксперимента на установке АW-200.

Следует отметить, что особенности реализованного косвенного метода нагрева расплава графитовыми нагревателями и обусловленные этим особенности конструкции установки АW-200 ограничили ее экспериментальные возможности в части исследования физико-химических процессов при взаимодействии расплава кориума с охлаждаемой корпусной сталью. В частности:

- Температура на поверхности стали, взаимодействующей с кориумом, в этих экспериментах была существенно меньше указанной температуры при удержании расплава в корпусе реактора.
- В экспериментах реализованы недостаточные плотности теплового потока от расплава к стали 90, 130 и 280 кВт/м². Для сравнения обоснование внутрикорпусного удержания АР600 и ВВЭР-440 проведено для плотности потока 350 кВт/м². Для реакторов большей мощности, для которых рассматривается удержание в корпусе, например АР-1000, тепловые потоки могут быть еще выше.

- Длительность взаимодействия не превышала нескольких часов, что может быть недостаточным для заметного развития физико-химических и коррозионных процессов. В условиях удержания расплава в корпусе существенные тепловые и физико-химические нагрузки на корпус реализуются в течение нескольких десятков часов.
- Используемая технология и огнеупорные материалы исключали проведение экспериментов в окислительной среде, а также с полностью окисленными составами, которые содержат оксиды железа.

В программе MASCA, недавно определены новые эффекты, которые важно учитывать при обосновании внутрикорпусного удержания. Одним из наиболее существенных является эффект экстракции урана и циркония расплавом стали при взаимодействии с расплавом неокисленного кориума. Концентрация урана и циркония в результирующем металлическом расплаве определяется количеством свободного циркония в исходном расплаве кориума и уран-циркониевым отношением в нем, а также соотношением масс стали и кориума. При определенных условиях концентрация урана и циркония оказывается столь высокой, что плотность металлического расплава оказывается большей, чем плотность оксидного расплава, что приводит к инверсии оксидного и металлического слоев. Этот эффект значительно усложняет описание процессов при внутрикорпусном удержании, поскольку обуславливает возможность существования структур бассейна с донным расположением металлического расплава или еще более сложных трехслойных структур.

Особенности физико-химического взаимодействия расплава кориума с охлаждаемой корпусной сталью исследуются по проекту METCOR. Результаты экспериментов показывают, что при характерных для внутрикорпусного удержания условиях (составы и температуры расплава, температуры и тепловые потоки на обращенной к расплаву поверхности корпусной стали) при различных кислородных потенциалах происходит высокотемпературная коррозия корпусной стали:

- по механизму окисления, с образованием в зоне взаимодействия оксидных слоев из компонентов стали и кориума, при высоком кислородном потенциале расплава;
- по механизму эвтектического плавления с образованием в зоне взаимодействия относительно легкоплавкой системы U-Zr-Fe-O, при низком кислородном потенциале, т.е. при наличии металлического циркония в кориуме.

Кинетика и финальная глубина коррозии корпусной стали определяются совокупностью процессов в бассейне расплава, обуславливающих подвод реагентов к зоне взаимодействия, и температурными условиями в зоне взаимодействия, обуславливаю-

щими толщину, состав, свойства и эволюцию корки кориума на поверхности корпусной стали в процессе развития коррозии.

Однако указанные эксперименты выполнены в малом масштабе – 1-2 кг расплава кориума с донным расположением образцов. Для реакторного применения полученных результатов крайне важно экспериментально определить влияние размеров (масштаба), специфической 2-D геометрии бассейна и реальной кривизны днища при внутрикорпусном удержании на особенности и характеристики выявленных коррозионных процессов.

Перечисленные выше новые экспериментальные результаты в совокупности со все еще имеющимися неопределенностями, затрудняющими их реакторное применение, обуславливают актуальность исследований по настоящему проекту.

2. ВОЗМОЖНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК ИАЭ НИЦ РК

Для достижения целей проекта используется установка ЛАВА-Б, созданная в Институте атомной энергии НИЦ РК в процессе выполнения международных программ COTELS и IVR-AM в кооперации с компанией NUPEC (Япония).

Установка ЛАВА-Б позволяет выполнять эксперименты с получением 60 кг расплава прототипного кориума (кориума на основе диоксида урана природного обогащения) и последующим сливом кориума с высоты около 1,7 м в экспериментальную секцию, содержащую модель днища силового корпуса реактора, оснащенную термопарами и деформации стенки модели. Плавление исходной шихты выполняется методом индукционного нагрева в "горячем" тигле в электроплавильной печи (ЭПП) установки ЛАВА-Б, расположенной над экспериментальной секцией.

Диаметр модели корпуса выбирается из расчета полного заполнения расплавом полуэллиптической части, с учетом возможного вытеснения части кориума из модели корпуса устройством для имитации остаточного тепловыделения.

Внутренний объем силового корпуса устройства приема расплава (УПР) составляет около 5 м³. Максимальное давление газовой среды в УПР вплоть до 4 МПа.

Оборудование установки ЛАВА-Б позволяет имитировать остаточное тепловыделение в кориуме, находящемся в модели корпуса, с помощью комплекта коаксиальных плазматронов, погруженных в бассейн расплава. Электрическая мощность оборудования для питания плазматронов составляет около 90 кВт.

В комплект технологического оборудования установки ЛАВА-Б входят три цистерны для подачи охлаждающей воды на поверхность кориума, находящегося в модели днища и на внешнюю поверхность модели днища. При этом внешнее охлаждение может выполняться как путем орошения стенки из форсунок, так и путем непрерывного заполнения

пространства между моделью днища и технологическим основанием.

Маломасштабные эксперименты на стенде ВЧГ-135 позволят усовершенствовать технологию нанесения защитного покрытия на внутреннюю поверхность графитовых тиглей, применяемых в электроплавильной печи индукционного типа для получения расплава кориума и на внешнюю поверхность графитовых наконечников электродов устройства для имитации остаточного тепловыделения в расплаве. Кроме того, в экспериментах на стенде ВЧГ-135 будут получены данные по промежуточным соединениям, формирующимся в процессе одновременного разогрева компонентов активной зоны. Полученные данные будут использованы в дальнейшем при послепусковом исследовании образцов кориума после экспериментов на установке ЛАВА-Б.

Оборудование материаловедческой лаборатории позволяет выполнять макро и микроструктурные исследования урансодержащих материалов после экспериментов по взаимодействию прототипного кориума с корпусной сталью, изучать фазовый и элементный состав продуктов взаимодействия, измерять плотность и электрическое сопротивление образцов материалов.

Экспериментальные исследования будут проведены с варьированием состава расплава, в том числе, с использованием оксидно-металлического расплава.

Полученные экспериментальные данные по структуре бассейна расплава, тепловым нагрузкам на днище корпуса и степени коррозионного повреждения корпусной стали будут представлены в форме, оптимальной для их использования при разработке моделей процессов и верификации расчетных кодов.

Участники проекта имеют большой опыт неректорных экспериментов с прототипным кориумом. Ими выполнен представительный ряд экспериментальных исследований по взаимодействию кориума легководных реакторов с теплоносителем, бетоном и материалом силового корпуса реакторов [15-21]. Выполнена большая серия поддерживающих экспериментов на маломасштабном стенде, посвященных исследованию различных способов защиты компонентов кориума от взаимодействия с материалом тигля (графитом) [22,23], изучению взаимодействия компонентов кориума между собой при их разогреве до температуры плавления, исследованию термостойкости компонентов бетона, а также изучению электросопротивления смеси материалов активной зоны при высокой температуре.

3. ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Проект относится к категории прикладных исследований. Основными результатами проекта будут являться полученные в крупномасштабных экспериментах данные по структурам бассейна расплава на днище корпуса и коррозии корпусной стали в зависимости от состава прототипного кориума и распределения тепловых нагрузок на кор-

пус. Полученные результаты могут быть использованы для разработки моделей, описывающих поведение расплава на внутрикорпусной фазе аварии, верификации соответствующих расчетных кодов при обосновании концепции IVR для имеющихся и вновь разрабатываемых проектов.

Технологические разработки, обеспечивающие плавку и удержание расплава кориума, могут быть использованы в практике аналогичных исследований и в промышленности при плавке химически активных и радиоактивных веществ.

4. ОБЪЕМ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В соответствии с содержанием Проекта предусматривается выполнение 4 задач. Все задачи предназначены для достижения целей – получения экспериментальных данных по процессам при IVR.

Задача 1. Модернизация установок и оптимизация технологии плавки и имитации остаточного тепловыделения. Задача состоит из следующих подзадач:

- Отработка технологии нанесения покрытия на внутреннюю поверхность графитового тигля. Отработка включает в себя эксперименты на маломасштабном стенде по нанесению покрытия и проверку его стойкости в экстремальных условиях, описание режимов нагрева крупномасштабного тигля, нанесение покрытия на крупномасштабный тигель.
- Отработка технологии нанесения покрытия на внешнюю поверхность графитовых наконечников электродов с применением стенда ВЧГ-135.
- Отработка режимов плавления и слива кориума в экспериментальную секцию без моделирования остаточного тепловыделения. В данной группе из 3-х крупномасштабных экспериментов применяются различные способы охлаждения кориума в экспериментальной секции.
- Отработка конструкции и режимов работы электродного имитатора остаточного тепловыделения в кориуме.
- Изготовление моделей днища и деталей экспериментальной установки.

Задача 2. Расчетное сопровождение экспериментов.

Расчетное моделирование бассейна расплава в модели днища и определение эффективности нагрева, распределения тепловых потоков и температур по внутренней поверхности модели днища.

- Расчет и оптимизация системы наружного охлаждения модели днища.
- Расчет температурного и напряженно-деформированного состояния модели (пре-тест и пост-тест расчеты).

Задача 3. Крупномасштабные эксперименты.

Проведение 3-х крупномасштабных экспериментов с подержанием энерговыделения в бассейне

расплава оксидного и оксидно-металлического кориума, находящимся в модели корпуса:

Система охлаждения модели днища должна обеспечивать представительную температуру на внутренней поверхности корпуса для различных угловых координат стенки корпуса.

Задача 4. Пост тест анализ.

Анализ проб кориума и корпусной стали включая:

Резку слитка и модели днища, отбор проб;

Рентгеновский фазовый анализ;

Металлографию;

Элементный анализ;

Обобщение результатов экспериментов;

Подготовка файла данных эксперимента для базы данных.

5. ТЕХНИЧЕСКИЙ ПОДХОД И МЕТОДОЛОГИЯ

Технический подход и методология предусматривает воспроизведение в модели днища корпуса основных процессов, характерных для условий IVR.

Для получения расплава прототипного кориума применяется индукционный нагрев методом "горячего тигля". Полученный кориум сливается из ЭПП в экспериментальную секцию с высоты около 1,7 м после достижения требуемой температуры расплава. Экспериментальная секция размещается в устройстве приема расплава (УПР), представляющее собой цилиндрический герметичный сосуд объемом около 5 м³, изготовленный из нержавеющей стали. Внутренняя поверхность УПР покрыта слоем теплоизоляции для ограничения утечек тепла.

Ограничение взаимодействия компонентов кориума с углеродом при их разогреве выполняется методом нанесения расплава циркония на внутреннюю поверхность тигля с последующей карбидизацией циркония. Аналогичный метод применяется при защите наружной поверхности наконечников электродов устройства для имитации остаточного тепловыделения в расплаве.

Модель днища силового корпуса реактора изготавливается из корпусной стали ВВЭР в масштабе около 1:10. Размер модели и его конфигурация определяются количеством максимально возможного объема кориума, получаемого в существующей электроплавильной печи установки ЛАВА-Б, а также заданными условиями теплового и физико-химического взаимодействия между кориумом и сталью. В связи с этим толщина стенки может не отражать масштаба диаметра модели. При этом соблюдается требование заполнения сливаемым кориумом всей полуэллиптической части модели, а при условии частичного вытеснения кориума электродами имитатора остаточного тепловыделения должна быть частично заполнена и цилиндрическая часть модели.

Имитация остаточного тепловыделения в модели корпуса осуществляется с помощью электродного нагревателя, погруженного в расплав методом прямого пропускания переменного тока через расплав и

разогрева электрической дугой за счет коаксиальной конструкции наконечников электродов.

Для измерения профиля тепловых потоков модель корпуса оснащается комплектом термодатчиков, смонтированных в стенку на разной глубине от внешней поверхности и в различных зонах по высоте и азимуту (в самой нижней точке модели, в полуэллиптической зоне, в цилиндрической зоне, а также в цилиндрической зоне, не заполняемой кориумом).

Деформация стенки модели в выбранных точках измеряется датчиками перемещения, установленными в зазоре между внешней стенкой модели и технологическим основанием.

Охлаждающая вода подается снизу в зазор между моделью корпуса и технологическим основанием, а сливается с верхней зоны. Подогрев и расход воды, подаваемой на охлаждение, измеряется соответствующими датчиками. Расход воды может регулироваться для обеспечения заданных условий эксперимента.

Количество испаренной воды при внешнем охлаждении оценивается за счет применения системы пароконденсации, входящей в состав экспериментальной установки.

Маломасштабные эксперименты выполняются на установке с индукционным нагревом, обеспеченной соответствующими средствами измерений температуры, давления внутри рабочей камеры и системой отбора проб газа в процессе эксперимента.

После каждого эксперимента выполняются исследования, включающие в себя следующие операции:

- Анализ состава проб газовой среды из ЭПП и УПР;
- Удаление фрагментированного кориума и анализ его гранулометрического состава;
- Продольная резка модели днища с застывшим расплавом (или без него при отсутствии прочного сцепления между кориумом и стенкой модели, - в этом случае слиток кориума разрезается отдельно от модели);
- Изучение структуры среза;
- Измерение глубины коррозии/проплавления стенки модели в плоскости разреза модели;
- Изготовление порошков из фрагментированного кориума и слитка кориума;
- Изготовление металлографических шлифов из образцов стенки модели;
- Изготовление образцов из области взаимодействия кориума с корпусной сталью;
- Элементный анализ порошковых образцов;
- Фазовый анализ порошковых образцов;
- Измерение плотности порошковых образцов и образцов слитка;

- Измерение удельного электрического сопротивления порошковых образцов и образцов слитка;
- Повторный переплав образцов кориума на маломасштабном стенде и последующий фазовый и элементный анализ результирующих материалов.

6. ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ДЕЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В рамках задачи 1 выполнялись работы по модернизации экспериментальной установки ЛАВА-Б и отработке отдельных технологических процессов подготовки и выполнения интегральных экспериментов (рисунок 1).

В процессе работы над проектом успешно решена задача нанесения защитного покрытия на внутреннюю поверхность графитовых тиглей малого и среднего масштаба. Предпринята попытка нанесения покрытия на крупномасштабные тигли, изготовленные из графита ГМЗ. В процессе отработки технологии нанесения расплава циркония на графитовые поверхности выявлена зависимость качества покрытия и глубины проникновения расплава циркония в стенку от пористости графита. Выполненные исследования подтвердили правильность выбора изостатического графита марки R4340 (с пористостью менее 11%) для крупномасштабных экспериментов.

В рамках первой задачи проекта успешно решена проблема нанесения защитного покрытия на внешнюю цилиндрическую поверхность изделий из графита (рисунок 2). Это позволило защитить графитовые наконечники внешних электродов плазматронов, погруженные в прототипный кориум, от взаимодействия с углеродом в процессе длительной выдержки при температуре выше 2600°C [24].

Предварительные расчеты экспериментальной секции показали, что при существующих параметрах установки ЛАВА-Б (максимальная масса расплава кориума, мощность единичного плазматрона, размеры экспериментальной секции) для поддержания в расплавленном состоянии не менее 60% слитого в модель корпуса расплава необходимая суммарная мощность устройства для имитации остаточного тепловыделения должна составлять не менее 85 кВт. В связи с этим было решено увеличить количество плазматронов в экспериментальной секции с 3-х имеющихся до пяти. Это явилось причиной разработки новой, более компактной конструкции плазматронов. В процессе отработки конструкции графитовых наконечников плазматронов найдена оптимальная форма и размеры наконечников, позволяющие поддерживать мощность плазматрона, близкую к максимально возможной (по электрооборудованию) в течение более 2 часов.

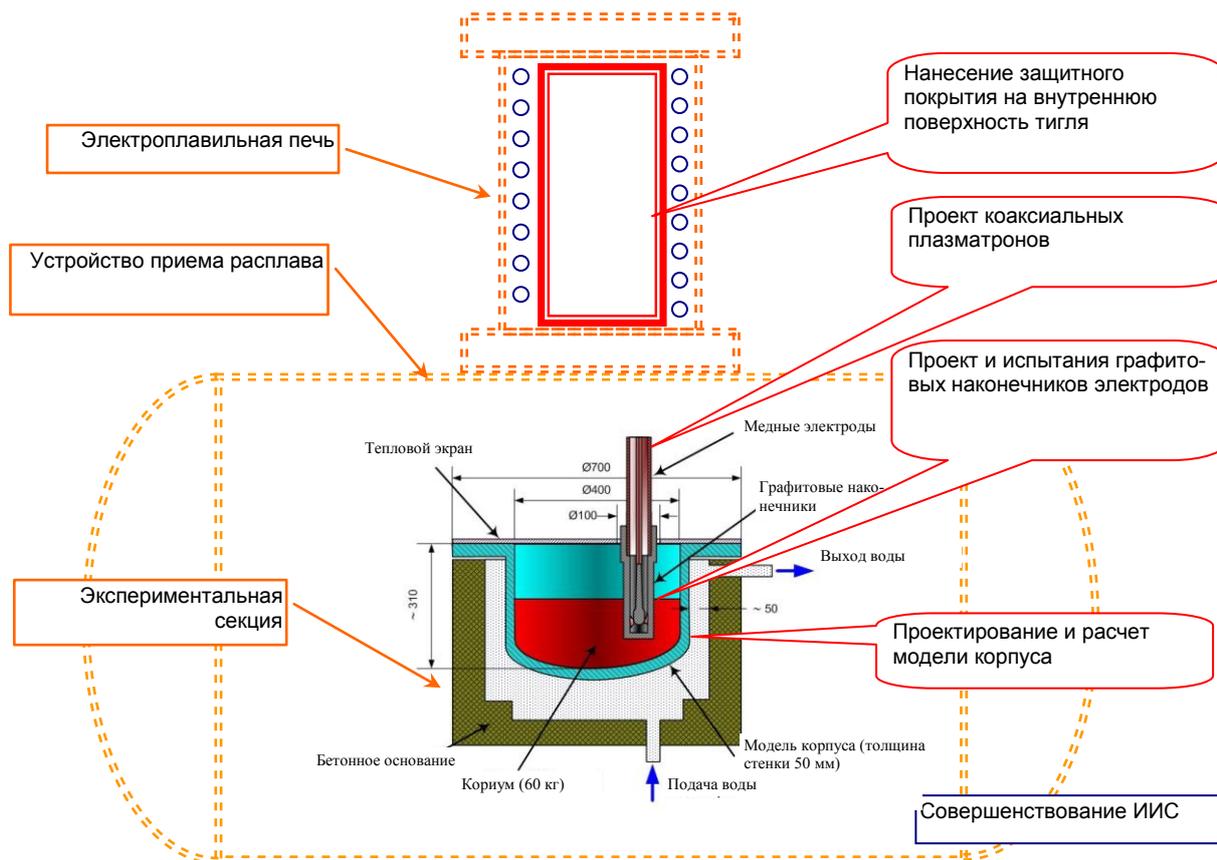


Рисунок 1. Основные подзадачи в рамках модернизации установки



Рисунок 2. Наконечники электродов плазматронов с покрытием из карбида циркония

Учитывая ряд проблем, связанных со стоимостью заготовок для моделей корпуса и с таможенными процедурами, было принято решение изготовить модели корпуса из обычной углеродистой стали (20Х), в стенку которой вставлены по тугой посадке образцы корпусной стали для реакторов ВВЭР (15Х2МНФА). В образцах корпусной стали подготовлены отверстия для установки горячих сплавов термопар на различную глубину от внешней поверхности. Внешняя поверхность модели покрыва-

ется слоем теплоизоляции (стеклотканью) и закрывается стальным экраном. Тепловые утечки с поверхности бассейна кориума ограничиваются применением верхнего теплового экрана, изготовленного из листового тантала. Полуэллиптическая форма модели позволит получить более равномерное температурное поле в бассейне кориума с применением электродной схемы имитации остаточного тепловыделения. Схема модели корпуса показана на рисунке 3.

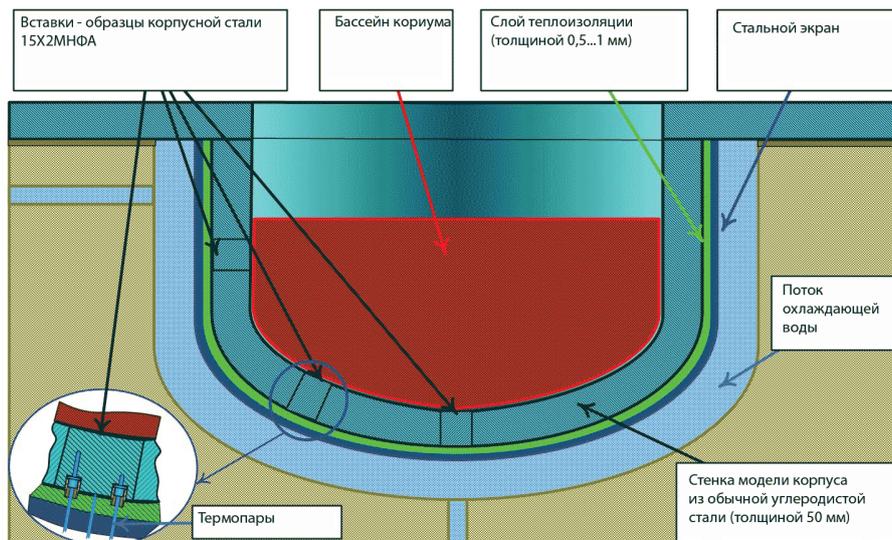


Рисунок 3. Схема модели корпуса для интегральных экспериментов

Предварительные расчеты показали, что применение профилированной теплоизоляции на внешней поверхности модели позволяет получить равномерное температурное поле на поверхности взаимодействия кориум/сталь (рисунок 4).

Таким образом, двойная толщина теплоизоляции в донной части по отношению к остальному слою стеклоткани позволит получить температуру до 1200°C на внутренней поверхности стенки модели корпуса при суммарной мощности электродного нагревателя 90 кВт и толщине стальной стенки 50 мм.

Эффективность защитного покрытия на внешней поверхности графитовых наконечников электродов, ресурс наконечников и мощность плазматронов экс-

периментально испытаны в процессе поддерживающих экспериментов [24]. В этих же экспериментах показано, что применение теплоизоляционного пакета позволяет получить температуру свыше 850°C на стальной стенке через слой кориума С-30 толщиной 30 мм.

На рисунке 4 показана конструкция экспериментальной секции в сборе с бетонным основанием и электродным нагревателем.

На рисунке 5 показано размещение экспериментальной секции в УПР установки ЛАВА-Б.

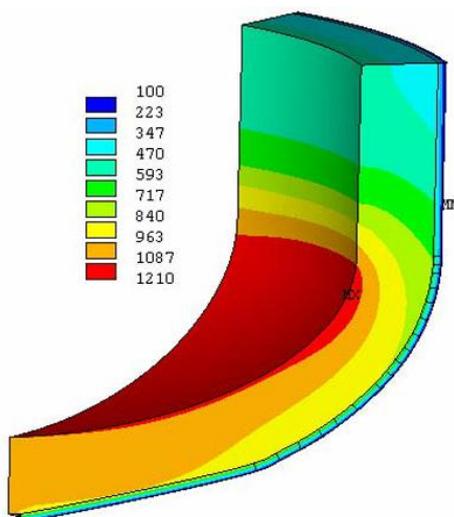


Рисунок 4. Профиль температуры на внутренней поверхности модели корпуса при следующих параметрах теплоизоляции: $\lambda/\delta=100$ на радиусе 120 мм от центра модели; $\lambda/\delta=200$ на остальной поверхности

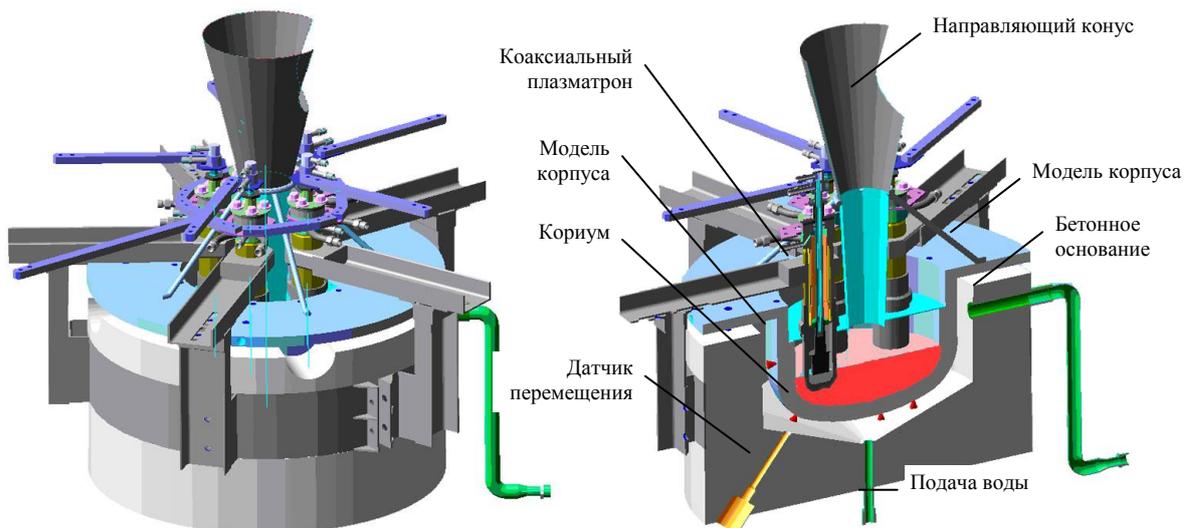


Рисунок 4. Испытательная секция для интегральных экспериментов INVECOR

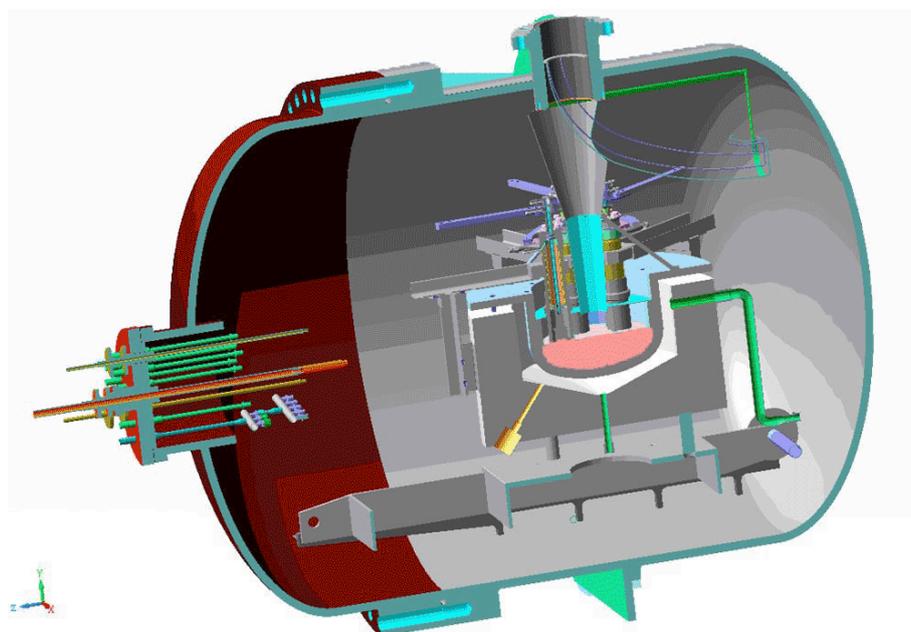


Рисунок 5. Экспериментальная секция в силовом корпусе установки ЛАВА-Б

В процессе многочисленных поддерживающих экспериментов решалась проблема оптимизации информационно-измерительной системы установки ЛАВА-Б с точки зрения повышения точности и помехозащищенности измерительных каналов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы по модернизации экспериментальной установки ЛАВА-Б и поддерживающие эксперименты, выполненные в течение 2 лет, подтвердили техническую возможность выполнения крупномасштабных интегральных экспериментов по моделированию поведения бассейна кориума на модели корпуса реактора с имитацией остаточного тепловыделения в топливе. При этом общая длительность единичного эксперимента может составить не менее 2 часов при

массе кориума 60 кг и электрической мощности плазматронного нагревателя 90 кВт. Обязательным условием успешного выполнения экспериментов является применение изостатического графита марки R4340 (производства фирмы SGL Carbon Group, Германия) для изготовления плавильного тигля и внешних наконечников коаксиальных плазматронов.

Экспериментальная проверка защитного покрытия на графитовых поверхностях, контактирующих с высокотемпературным кориумом, показала надежность покрытия на поверхности наконечников плазматронов при температурах 2500...2600°C и свыше 2800°C на внутренней поверхности графитового тигля.

Применение теплоизоляционного пакета на внешней поверхности модели корпуса позволит

увеличить температуру в зоне взаимодействия кориюм/сталь до 1000...1100°C, что соответствует температуре физико-химического взаимодействия между исследуемыми материалами.

Проект INVECOR включен в перечень экспериментальных работ европейской ассоциацией SARNET, занимающейся систематизацией методов, расчетных кодов и экспериментальных данных в области исследования тяжелых аварий в активной зоне ядерных реакторов [25].

ЛИТЕРАТУРА

1. Безруков, Ю.А. Исследование теплоотдачи от нижней части корпуса реактора в аварии с плавлением топлива / Ю.А. Безруков, С.А. Логвинов, В.П. Оншин // Первая Российская национальная конференция по теплообмену. - М. : Изд-во МЭИ, 1994. - Т. 4. - С. 19-25.
2. Theofanous, T.G. In-vessel retention as a severe accident management strategy // In-Vessel Core Debris Retention and Coolability. Workshop Proceedings, 3-6 March 1998. - Garching near Munich, Germany. NEA/CSNI/R(98), - 1999. -18 February. - P. 53-74.
3. Ex-vessel boiling experiments: laboratory and reactor-scale testing of the flooded cavity concept for in-vessel core retention / T.Y. Chu et al // Nuclear Engineering and Design. - 1997. - V.169. - P. 89-99.
4. Грановский, В.С. Экспериментальное определение критических тепловых потоков при наружном охлаждении корпуса реактора / В.С. Грановский, В.К. Ефимов, О.Д. Черный // Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР. Труды международной конференции "Теплофизика – 95". Ноябрь 21-24, 1995. - Обнинск. - Т.1. - С. 190-195.
5. Грановский, В.С. Экспериментальное определение критических тепловых потоков на наружной поверхности модели корпуса реактора ВВЭР-640 / В.С. Грановский, В.К. Ефимов, О.Д. Черный // Процессы тепломассообмена и гидродинамики в системах безопасности АЭС с ВВЭР-640. - С.-Петербург. 1997. - С. 104-107.
6. Rouge S. SULTAN test facility for large-scale vessel coolability in natural convection at low pressure // Nuclear Engineering Design. - 1997. - V. 169. - P. 185-195.
7. Bonnet, J.M. Large Scale Experiments for Core Melt Retention / J.M. Bonnet S., Rouge and J.M. Seiler // Presented at the OECD/CSNI/NEA Workshop on Large Molten Pool Heat Transfer, March 9-11, 1994. - Grenoble, France. - P. 503-512.
8. Bonnet, J.M. Thermal hydraulic phenomena in corium pools. The BALI Experiment // J.M.Bonnet, J.M.Seiler. 7th International Conference on Nuclear Engineering, 19-23 April 1999. - Tokyo, Japan. - ICONE-7057.
9. Sehgal, B.R. "SIMECO Experiments on In-Vessel Melt Pool Formation and Heat Transfer with and without a Metallic Layer" / B.R. Sehgal, T.N. Dinh, V.A. Bui, J.A. Green, G. Kolb // Presented in OECD/CSNI Workshop on "In-Vessel Core Debris Retention and Coolability", 3-6 March 1998. - Garching, Germany.
10. Bolshov L. "Natural convection in heat-generating fluids" / L. Bolshov, P. Kondratenko, V. Strizhov // Uspekhi Fizicheskikh Nauk, - 2001. - V. 171. - P. 1051-1070.
11. Mechanical Behavior of Reactor Vessel Lower Head During Late Phase of Reactor Accident / T.Y. Chu et al // Proceedings of RASPLAV Seminar, 14-15 November, - 2000. - Munich, Germany.
11. RUPATHER: a Program Devoted to Modeling the Failure of the RPV Lower Head / J.M. Devos et al // ASME PVP Conference. – Montreal. - 1996.
12. Coupled Melt Pool Convection and Vessel Creep failure: the FOREVER program / B.R. Sehgal et al // Proceedings of RASPLAV Seminar, 14-15 November, - 2000. - Munich, Germany.
13. Behavior of the Corium Melt Pool in LWR Lower Head with External Cooling / V.G. Asmolov et al // RASPLAV Final Report, Russian Research Center «KURCHATOV INSTITUTE», OECD RASPLAV Project. – Moscow. - 2000.
14. COTELS Project (1): Overview of Project to study FCI and MCCI during a Severe Accident / V. Zhdanov et al. // OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, FZKA6475. – 2000. - Karlsruhe, Germany. - P. 285–292.
15. COTELS Project (2): Fuel Coolant Interaction Tests under Ex-Vessel Conditions / V. Zhdanov et al. // OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, FZKA6475.- 2000. - Karlsruhe, Germany.- P. 293–300.
16. COTELS Project (3): Ex-vessel Debris Cooling Tests / V. Zhdanov et al. // OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, FZKA6475. – 2000. - Karlsruhe, Germany. - P. 302–308.
17. COTELS Project (4): Structural Investigation of Solidified Debris in MCCI, OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability / V. Zhdanov et al. // FZKA6475. – 2000. - Karlsruhe, Germany. - P. 309–316.
18. Исследования последствий тяжелых аварий водоохлаждаемых энергетических ядерных реакторов по проекту COTELS / Ю.С. Васильев и др. // Вестник НЯЦ РК. - Вып. 1, март 2002. – С. 5 – 17.
19. A Study on Concrete Degradation during Molten Core/Concrete Interactions / V. Zhdanov, et al. // Nuclear Engineering and Design. – 2006. – V. 236. - P. 2237–2244.
20. Results of LHI tests and associated analyses on in-vessel debris coolability / Yu Maruyama et al // Proc of Third Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety, 13-16 October, 2002. - Kyeongju, Korea.

21. Жданов, В.С. " Изучение способов защиты графитового тигля от эрозии при плавлении тугоплавких оксидных материалов" / В.С. Жданов, В.В. Бакланов, И.М.Кукушкин // Вестник НЯЦ РК. - Вып. 2, май 2003.
22. Жданов, В.С. Экспериментальное изучение способов ограничения взаимодействия компонентов кориума с углеродом / В.В. Бакланов, В.С. Жданов, Е.В. Малышева // Вестник НЯЦ РК. - Вып. 1. - март 2004. - С. 75-85.
23. Поддерживающие эксперименты в обоснование конструкции устройства для моделирования остаточного тепловыделения в проекте INVECOR /В.В. Бакланов и др. // Сб. докладов на международной конференции "Ядерная энергетика в республике Казахстан ЯЭ-2008". – 2008. - Курчатов, Казахстан.
24. Research and development with regard to severe accidents in pressurized water reactors // Rapport IRSN-2007/83/Rapport CEA-2007/351, - 218 p, Cadarache, France.

**(INVECOR) РЕАКТОР КОРПУСЫНДА КОРИУМ ҚОРЫТЫНДЫСЫНҰСТАП
ҚАЛУ КЕЗІНДЕ ПРОЦЕССТЕРДІ ЭКСПЕРИМЕНТАЛДЫ ЗЕРТТЕУ**

ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан

В.В. Бакланов, В.С. Жданов, Е.В. Малышева

Қысым астында реактор сыртында сумен белсенді белдеу қорытындысын ұстап қалу кезінде кориум бассейнде эксперименталды зерттеуге арналған ХҒТО жобасы сипатталды. 60 кг алдын ала ертілген кориум мен 1:12 масштабнда корпус модельдерімен ірі масштабы эксперименттерді орындау жоспарлануда. Эксперименттерді орындау үшін "ЛАВА-Б" индукционды жылумен қондырғы және 90 кг дейін жалпы қуатпен коаксикалды плазматрондар негізінде қалдық жылу шығаруды өңдеу үшін құрылғы қолданылады. Алдын-ала эксперименттер корпус моделін ішкі бетін судың үздіксіз ағынымен салқындату кезінде 2 сағаттан аса арасында эксперименттерді орындау мүмкіндігін растады. Корпус моделін ішкі бетінде кескінделген жылылықты өткізбеу пакетін қолданудың орнына физика- химиялық «кориум/болат» әрекеттестігі үшін шартты құру үшін және карбидизациядан кориум компоненттерін қорғау үшін түпкі техникалық шешімдер табылды. Экспериментальды қондырғы жобасы әзірленді, алдын-ала есебі орындалды, экспериментальды қондырғының жүйе мен бөлек түйіндердің жұмысқа қабылеттілігінің негізіне растайтын эксперименттер жүргізілді.

**EXPERIMENTS ON CORIUM MELT RETENTION
IN THE REACTOR PRESSURE VESSEL (INVECOR)**

Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

V.V. Baklanov, V.S. Zhdanov, E.V. Malysheva

ISTC Project devoted to an experimental research of processes in prototypic corium pool at core melt retention in reactor pressure vessel of RPW is described. Performance of large-scale experiments with reactor pressure vessel models in scale 1:12 and 60 kg of preliminary melted corium has been planned. "LAVA-B" facility with induction heating and the device for decay heat modeling on the basis of coaxial plasmatrons of total power up to 90 kg is applied for performance of experiments. Preliminary experiments have confirmed possibility of performance of experiments within more than 2 hours at cooling of an external surface of reactor pressure vessel model by a continuous water flow. Original technical decisions for protection of corium components against carbiding and for creation of conditions for physico-chemical interaction "corium/steel" by application of profile thermal insulating package on an external surface of model of the reactor pressure vessel have been found. The project of the experimental device has been developed; pre-test calculations have been executed; the supporting experiments in a substantiation of efficiency of separate units and systems of experimental facility have been conducted.

УДК 621.039.53.536

**ПОДДЕРЖИВАЮЩИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ В ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВА
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ В ПРОЕКТЕ INVECOR**

¹⁾Бакланов В.В., ¹⁾Жданов В.С., ¹⁾Мальшева Е.В., ¹⁾Кукушкин И.М.,
¹⁾Игнашев В.И., ¹⁾Кукушкин М.И., ¹⁾Микиша А.В., ²⁾Зверев В.В.

¹⁾Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан
²⁾Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов

Описаны поддерживающие эксперименты в обоснование работоспособности отдельных узлов установки "ЛАВА-Б", применяемой при выполнении экспериментов по исследованию процессов в бассейне кориума при удержании расплава активной зоны в корпусе реактора с водой под давлением. В первой группе экспериментов осуществлялся выбор материалов теплоизоляционного пакета на внешней поверхности модели корпуса реактора для создания условий для физико-химического взаимодействия "кориум/сталь". Вторая группа экспериментов была посвящена отработке технологии нанесения защитного покрытия на внешнюю поверхность графитовых наконечников коаксиальных плазматронов, применяемых в устройстве для имитации остаточного тепловыделения в кориуме. В третьей группе интегральных экспериментов выполнена проверка эффективности защитного покрытия на поверхности графита при длительной выдержке коаксиального плазматрона в смеси материалов активной зоны, соответствующей кориуму состава С-32, а также оценке эффективности теплоизоляционного пакета на внешней поверхности модели корпуса. Выполненные эксперименты подтвердили надежность покрытия при работе коаксиального плазматрона с графитовым наконечником на мощности свыше 18 кВт в течение 2 часов. Выбранная конструкция теплоизоляционного пакета позволила при этом достичь температуры более 850°C, что достаточно для начала физико-химического взаимодействия "кориум/сталь".

ВВЕДЕНИЕ

Работы, проводимые Институтом атомной энергии по проекту МНТЦ "INVECOR", направлены на улучшение обоснования безопасного удержания расплава в корпусе легководного реактора в условиях тяжелой аварии. Целью проекта является экспериментальное моделирование тепловых и физико-химических процессов при удержании бассейна расплава прототипного кориума на днище водоохлаждаемого корпуса реактора.

В практике исследования внутрикорпусного удержания достаточно полно изучены теплогидравлические процессы на модельных расплавах. Физико-химические процессы в бассейне расплава исследованы в программах RASPLAV и MASCA в маломасштабных экспериментах и в некоторых крупномасштабных опытах. Физико-химические процессы взаимодействия кориума с корпусной сталью исследованы только в маломасштабных экспериментах по проекту МНТЦ METCOR.

В проекте INVECOR одновременно исследуется совокупность тепловых и физико-химических процессов при удержании расплава реального кориума в крупномасштабной модели днища силового корпуса реактора типа ВВЭР.

Для выполнения экспериментов используется установка "ЛАВА-Б". Установка оснащена индукционной печью для получения расплава прототипного кориума и устройством приема сливаемого расплава, содержащего водоохлаждаемую модель днища корпуса реактора, устройство для имитации остаточного тепловыделения и набор датчиков темпера-

туры, давления и деформации. Для подготовки крупномасштабных опытов и оптимизации инженерно - технологических решений проводятся поддерживающие эксперименты на маломасштабном стенде "ВЧГ-135".

Процесс удержания кориума в корпусе реактора сопровождается как термическим воздействием на стальную стенку со стороны бассейна кориума, так и физико-химическим взаимодействием между компонентами кориума и сталью. Из результатов ранее выполненных экспериментов по программам CORA, RASPLAV, METCOR известно, что физико-химическое взаимодействие начинается при температуре выше 900°C в зоне контакта кориума со стальной стенкой. Для обеспечения таких условий в установке "ЛАВА-Б" при существующих возможностях по массе сливаемого кориума и мощности устройства для имитации остаточного тепловыделения потребовалось бы увеличить толщину стенки модели днища корпуса до более чем 200 мм. Размещение такой модели в корпусе устройства приема расплава невозможно из-за ограниченных габаритов устройства. Для решения этой проблемы было предложено использовать теплоизоляционный слой между внешней стенкой модели днища корпуса и охлаждающим потоком воды.

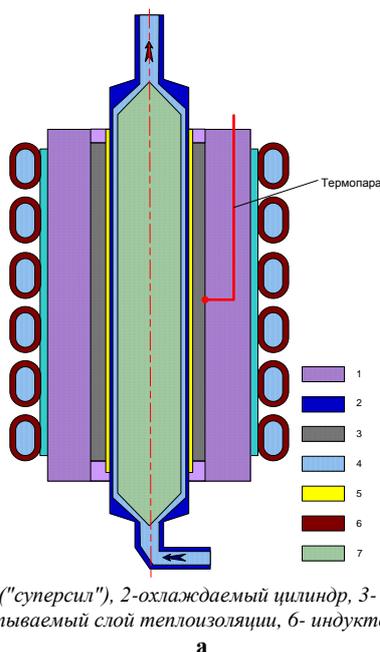
Для проверки работоспособности предложенного варианта выполнены моделирующие эксперименты на стенде ВЧГ-135, а также проведены эксперименты по нагреву прототипа кориума одним плазматроном в специальной экспериментальной секции на установке ЛАВА-Б. В экспериментах решались две

задачи: испытание теплоизолирующих свойств выбранного материала и конфигурации, а также проверка эффективности защиты кориума от взаимодействия с графитом наконечника плазматроного нагревателя.

1 ВЫБОР СПОСОБА ПОВЫШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕНКИ МОДЕЛИ ДНИЩА РЕАКТОРА

Эффективность применения теплоизоляционного пакета была первоначально проверена в маломасштабной установке. Для этого было изготовлено специальное калориметрическое устройство (рисунок 1) позволяющее провести нагрев стальной втулки 3 ин-

дукционным способом со стоком тепла с внутренней ее поверхности через слой стеклоткани на тонкостенный водоохлаждаемый цилиндр 2. Температура стенки внутреннего цилиндра при интенсивном охлаждении принималась равной температуре охлаждаемой воды, скорость протекания воды была также увеличена для исключения пристеночного перегрева воды. При подаче напряжения на индуктор и нагреве стальной втулки, между втулкой и цилиндром, охлаждаемым водой, должен сформироваться необходимый перепад температуры.



1- теплоизоляция ("суперсил"), 2-охлаждаемый цилиндр, 3- нагреваемая втулка, 4- вода, 5- испытываемый слой теплоизоляции, 6- индуктор, 7- вытеснитель



Рисунок 1. Схема калориметрической сборки (а), внешний вид калориметра (б)

В качестве кандидатных материалов теплоизоляционного слоя были выбраны ткани из графита и стекловолкна. Перед экспериментальными измерениями свойств теплоизоляции из указанных материалов проводились оценочные расчеты, результаты, которых косвенно подтверждали возможность применения выбранного способа.

1.1 Эксперименты по определению теплопроводности изоляции

Схема водоохлаждаемой калориметрической сборки, используемой в экспериментах, показана на рисунке 1. Предполагалось, что при известной мощности, затраченной на нагрев устройства, и измеренном перепаде температуры на внешней и внутренней поверхности теплоизоляции, теплопроводность кандидатных материалов будет найдена из соотношения:

$$Q = \frac{2\pi\lambda \cdot l}{\ln(d_{out}/d_{in})} (T_{in} - T_{out}), \quad (1)$$

где Q – мощность, затраченная на нагрев устройства; λ – искомая теплопроводность материала; d_{in} , T_{in} – соответственно диаметр внутренней поверхности теплоизоляции и температура на внутренней поверхности теплоизоляции; d_{out} , T_{out} – соответственно диаметр внешней поверхности теплоизоляции и температура на внешней поверхности теплоизоляции.

Некоторые параметры калориметрического устройства приведены в таблице 1.

Средняя температура воды, измеренная на входном коллекторе охлаждения (измеренная термометром сопротивления) составила 16°C.

Таблица 1. Параметры ЭУ

№	Параметр	Значение
1	Высота индуктора, мм	100
2	Внутренний диаметр индуктора, мм	90
3	Частота ВЧ генератора, кГц	66
4	Размер стальной втулки $d_{in} \times d_{ex} \times h$,	40×46×100
5	Размер охлаждаемого цилиндра $d_{in} \times d_{ex} \times h$,	36×39×150
6	Температура воды на входе, С°	15-20
7	Внешняя теплоизоляция	«Суперсил»
8	Толщина испытываемой изоляции, мм	0,3 - 0,5
9	Площадь проходного сечения калориметра S_p , мм ²	486,7
10	Размер цилиндра $d_{in} \times d_{ex} \times h$,	40×46×100
11	Расход воды Q, л/с	0,208

1.2 Результаты экспериментов

В каждом из выполненных экспериментов было реализовано 3 режима, на каждом из которых достигалась стабилизация тепловых параметров устройства при условии поддержания постоянного уровня мощности, подводимой к сборке:

- режим 1, мощность, подводимая к устройству, составляла 0,5...0,7 кВт;
- режим 2, мощность, подводимая к устройству, составляла около 1,5 кВт;
- режим 3, мощность, подводимая к устройству, составляла 3,5...3,7 кВт;

Внешний вид калориметрической сборки во время испытания и диаграмма нагрева представлены на рисунке 2.

По измеренному перепаду температуры и мощности, подведенной к устройству, были определены величины коэффициентов теплопроводности исследуемых материалов. Величины коэффициентов теплопроводности сталей различных марок взяты из литературы [1]. Наряду с определением теплопроводности исследуемых материалов, для оценки кор-

ректности методики, была рассчитана эффективная теплопроводность стальной втулки.

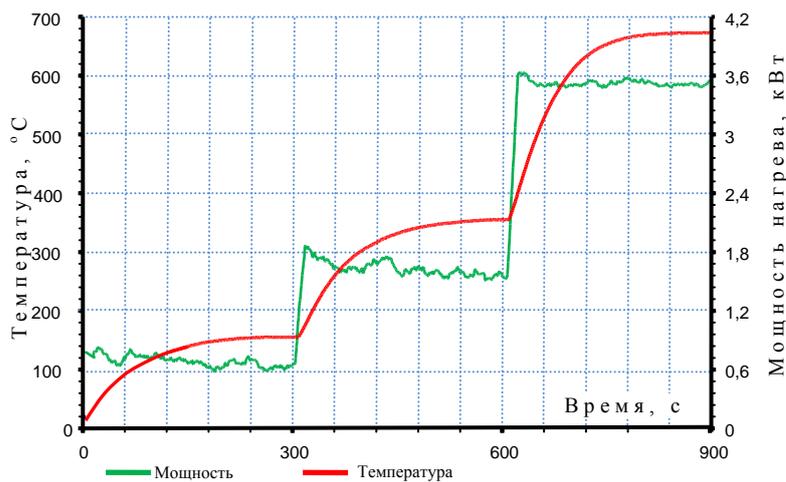
Электромагнитные расчеты установки ВЧГ-135 показали, что поле энерговыделения, создаваемое индуктором установки, имеет высокую высотную неравномерность. Так, энерговыделение в центральной части стальной втулки устройства превышает энерговыделение вблизи торцов втулки в полтора раза. Термопары расположены на уровне середины высоты устройства, поэтому значения мощности, подводимой к сборке, которые используются в соотношении (1), при расчете коэффициентов теплопроводности, были увеличены в полтора раза.

Реализованные в ходе экспериментов тепловые потоки на режиме 3 составили 460...480 кВт/м². Эти потоки несколько меньше тепловых потоков на внешней стенке модели днища, которые составляют около 780 кВт/м².

Рассчитанные значения коэффициентов теплопроводности (λ) стали, стеклоткани и графитовой ткани на режимах 2 и 3 приведены в таблице 2.



а



б

Рисунок 2. Сборка во время испытания (а), температура втулки и подводимая электрическая мощность (б)

Таблица 2. Значения теплопроводности материалов калориметрической сборки

№	Режим 2			Режим 3 (максимальный)		
	λ стали, Вт/(м К)	λ теплоизоляции, Вт/(м К)	λ/δ	λ стали, Вт/(м К)	λ теплоизоляции, Вт/(м К)	λ/δ
К-2	26,7	0,18	514	22,4	0,21	600
К-3	14,2	0,23	657	23,7	0,22	629
К-4	11,7	2,63	7514	40,6	1,56	4457

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод, что наиболее показательным был эксперимент К-2, в котором значения коэффициентов теплопроводности стали и теплоизоляции на втором и третьем режимах имеют незначительные deviations, причем рассчитанная теплопроводность стали хорошо коррелирует с литературными данными [1]. С результатами эксперимента К-2 согласуются данные, полученные на режиме 3 эксперимента К-3.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что значения коэффициента теплопроводности слоя стеклоткани лежат в диапазоне 0,18...0,23 Вт/(м К).

Эксперимент К-4 по исследованию коэффициента теплопроводности графитовой ткани был менее результативным: значения теплопроводности как стали, так и графитовой ткани на режимах 2 и 3 имели значительный разброс.

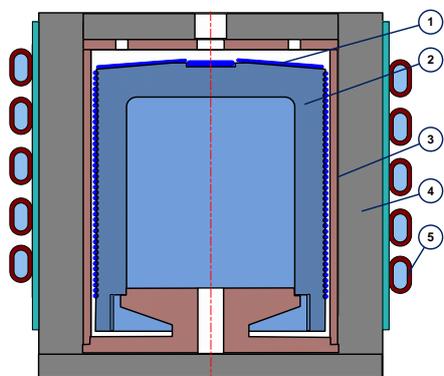
Испытания калориметрической ячейки показали возможность увеличения температуры в зоне предполагаемого взаимодействия "кориум/сталь" до 850...900°C за счет применения теплоизоляционного слоя из стеклоткани.

2 ПОДГОТОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для выполнения экспериментов с одним из штатных плазматронов установки "Лава-Б" были выполнены расчет параметров и разработка экспериментального устройства (ЭУ). Кроме того проведены эксперименты по нанесению защитного покрытия на рабочую часть плазматрона.

2.1 Способ защиты от влияния графита на кориум

Одним из важных этапов подготовки полномасштабных экспериментов являлась проверка работоспособности предложенного ранее защитного покрытия на основе карбида циркония. [3,4] Нанесение защитного покрытия на наконечник плазматрона выполнялось на стенде "ВЧГ-135". Для получения равномерного покрытия на боковой поверхности наконечника была выполнена метрическая резьба с шагом 1,5 мм, в которую была навита циркониевая проволока диаметром 0,9 мм. На торцевой поверхности наконечника выполнена кольцевая нарезка с профилем подобно резьбе и размещены отдельные циркониевые пластинки толщиной 2 мм (рисунок 3).



1- цирконий, 2- наконечник плазматрона, 3- нагреватель, 4-теплоизоляция, 5- индуктор
Схема нанесения покрытия на наконечник



Этап подготовки к покрытию



Наконечник с покрытием

Рисунок 3. Нанесение защитного покрытия

2.2 Расчетная оценка нагрева кориума с использованием плазматрона

Работоспособность плазматрона и эффективность нагрева кориума предполагается проверить на отдельных экспериментах серии ТОП (Тест Одного Плазматрона). Для оценки режимов экспериментов выполнены теплогидравлические расчеты устройства. В качестве граничных условий при проведении расчетов устройства принималось, что сток тепла с верхнего наконечника плазматрона и крышки уст-

ройства отсутствует. Зазор в цилиндрической части водяного тракта охлаждения устройства принимался равным 2 мм, расход охлаждающей воды варьировался в диапазоне 0,2–1 кг/с. Температура воды на входе в тракт охлаждения принималась равной 300 К.

Теплофизические свойства кориума С-32, использованные при проведении расчетов, сведены в таблице 3. Теплота плавления кориума С-32 принята – 258,3 кДж/кг [5].

Таблица 3. Теплофизические свойства кориума С-30

Температура, К	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2500	3000	3500
Плотность, кг/м ³	9215	9151	9089	9023	8952	8885	8813	8662	8467	7786
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	294,2	317,3	336,1	345,3	351,2	353,0	386,6	508,3	599,3	439,5
Теплопроводность, Вт/(м·К)	8,49	7,44	7,14	7,24	7,60	8,17	8,91	9,32	9,78	9,48

Тепловая мощность, передаваемая от плазматрона в кориум, определялась путем задания энерговыделения, равномерно распределенного в объеме плазматрона. Теплопроводность материала плазматрона взята бесконечно большой (~2000 Вт/(м·К)), таким образом моделировалось, что по толщине материала плазматрона практически должен отсутствовать перепад температуры.

Выполненные расчеты показывают, что при максимальной мощности плазматрона установки 18 кВт (задаваемое в расчетах энерговыделение в материале плазматрона 36 МВт/м³) температура поверхности плазматрона и слоев кориума, прилегающих к плазматрону, приближается к 2400 К (рисунок 4).

Кориум С-30 обладает хорошими теплоизолирующими свойствами, поэтому при расходе воды в тракте охлаждения равном 1 кг/с и интенсивном

отводе тепла от кориума, его температура в области контакта с водой не должна превышать температуру кипения воды. При расходе воды 0,2 кг/с на стенке тракта охлаждения возможно образование паровой пленки, т.е. кипение недогретой воды. Однако, подогрев воды в тракте охлаждения устройства при таких параметрах работы плазматрона составит около 20 градусов, образовавшийся пар полностью конденсируется.

Расчетное время стабилизации температурного поля в материалах установки с момента начала нагрева составляет около 10 минут. На рисунке 5 приведено изменение температуры поверхности плазматрона и кориума вблизи поверхности плазматрона после его включения, а также прогрев кориума вблизи стенки тракта охлаждения при расходе охлаждающей воды 0,2 кг/с и 1 кг/с.

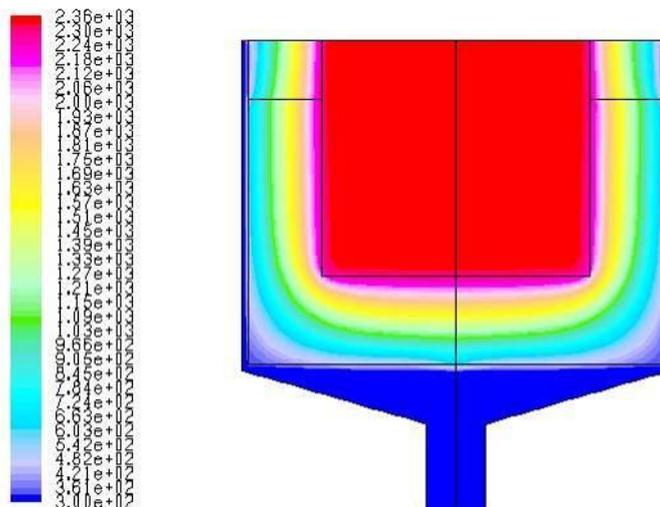


Рисунок 4. Стационарное температурное поле в материалах установки при мощности плазматрона 18 кВт

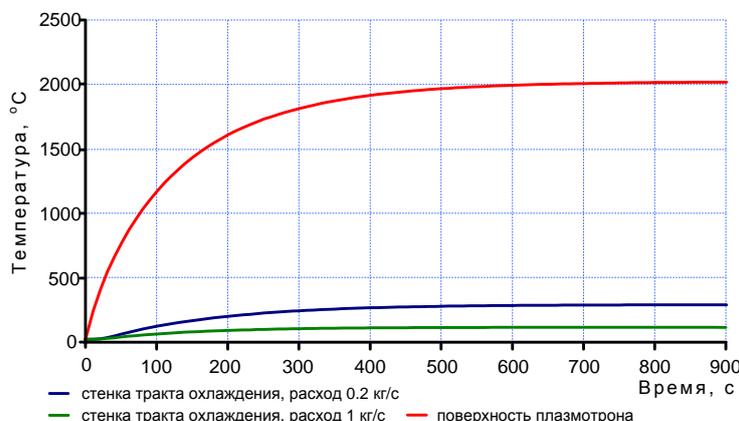
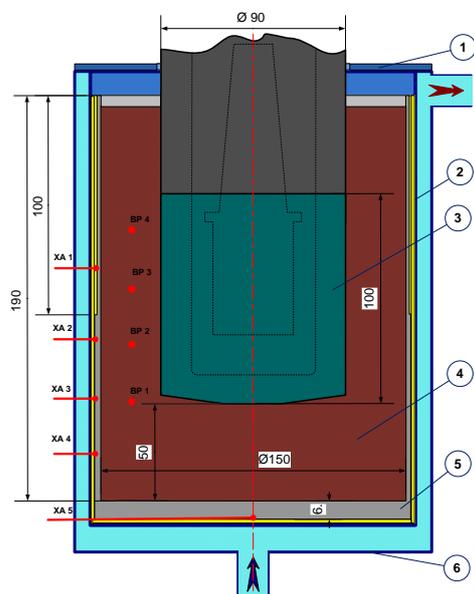


Рисунок 5. Изменение температуры материалов устройства при включении плазматрона

По результатам расчетов и оценки технических возможностей экспериментального оборудования установки "ЛАВА-Б" была предложена схема экспериментального устройства (рисунок 6а). Для реализации запланированных экспериментов было разработано и изготовлено ЭУ размещаемое в устройстве

приема расплава (УПР) установки "ЛАВА-Б" (рисунок 6б).

Для измерения температуры использовались термопары: градуировки ХА стенки стакана и ВР 5/20 для измерения температуры загрузки прототипа кориума.



1- экран, 2- стеклоткань, 3- наконечник плазматрона с покрытием, 4- шихта прототипа кориума, 5- стальной стакан, 6- охлаждаемый корпус ЭУ



Рисунок 6. Схема экспериментального устройства (а), ЭУ в сборе (б)

3 ЭКСПЕРИМЕНТЫ ТОП

Некоторые основные характеристики 4-х проведенных экспериментов на установке "ЛАВА-Б" приведены в таблице 4.

В каждый последующий эксперимент вносились корректировки в зависимости от результата предыдущего. Поскольку размеры внешнего корпуса экспериментального устройства не изменялись необходимый зазор между охлаждаемой стенкой и внутренним теплоизолированным стаканом варьировались диаметром последнего. Основные размеры трех вариантов стакана ЭУ приведены на рисунке 7. При увеличении газового зазора между корпусом и

стаканом центровка обеспечивалась полосами стеклоткани, зафиксированными сверху и внизу стакана.

В эксперименте ТОП-1 использовали один слой стеклоткани, как на боковой поверхности так и на дне стакана, в последующих экспериментах верхняя половина стакана имела двойной слой теплоизоляции, что позволяло снизить теплосъем с верхней более холодной части. Графики изменения температуры стенки стакана в течение эксперимента в трех первых экспериментах приведены на рисунке 8а, б, в.

Следует отметить, что выход на относительную стабилизацию показаний датчиков температуры происходил приблизительно на десятой минуте, что хорошо коррелирует с пре-тест расчетом.

Таблица 4. Параметры экспериментов ТОП

№	Параметр	ТОП-1	ТОП-2	ТОП-3	ТОП-4
1	Масса загрузки прототипа кориума, г	10000	11000	9500	12100
2	Длительность испытания, мин	61	121	120	80
3	Максимальная электрическая мощность, кВт	18	17,5	17	19
4	Максимальная температура на стенке стакана, °С	1040	980	860	920
5	Толщина дна экспериментального стакана, мм	2	6	6	6

ПОДДЕРЖИВАЮЩИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ В ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВА
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО ТЕПЛОУДЕЛЕНИЯ В ПРОЕКТЕ INVECOR

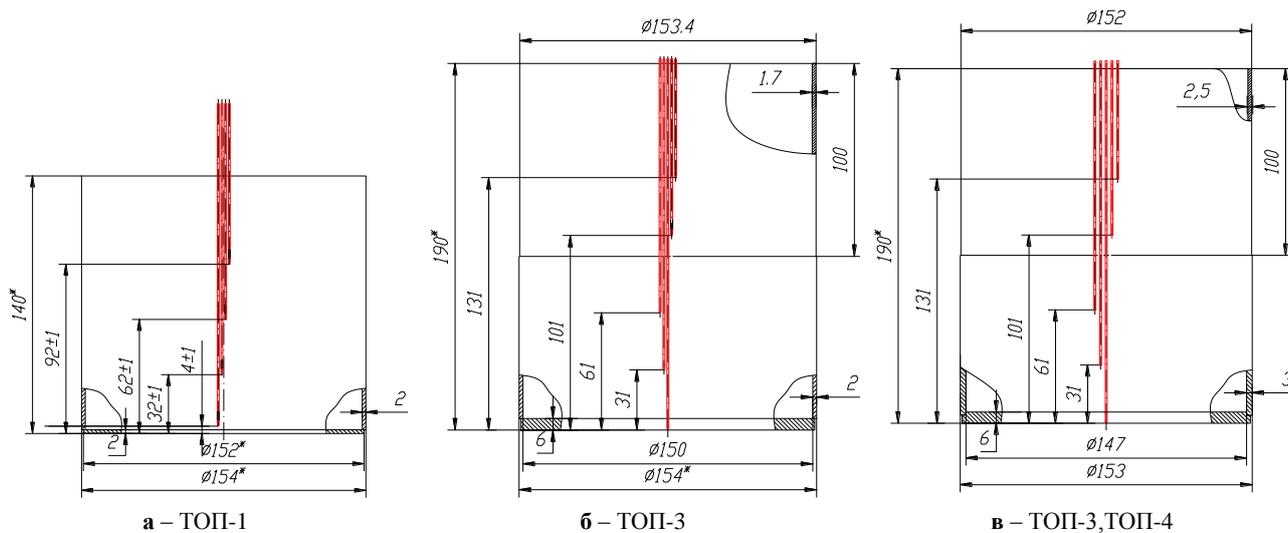


Рисунок 7. Размеры стального стакана в экспериментах

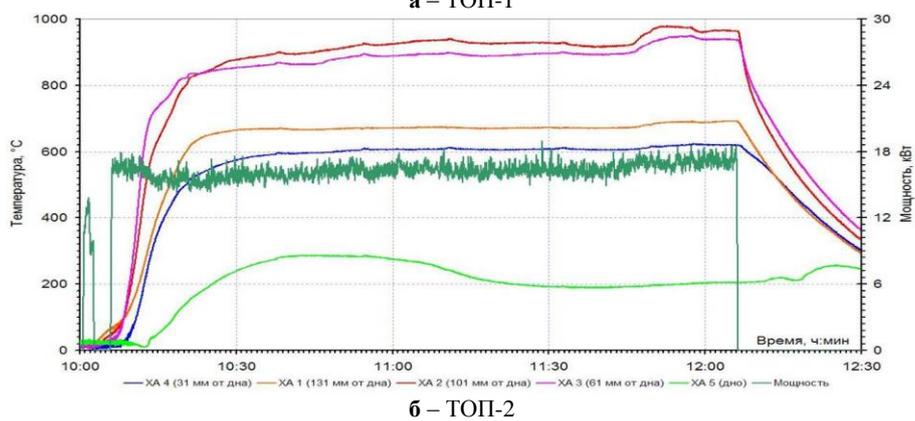
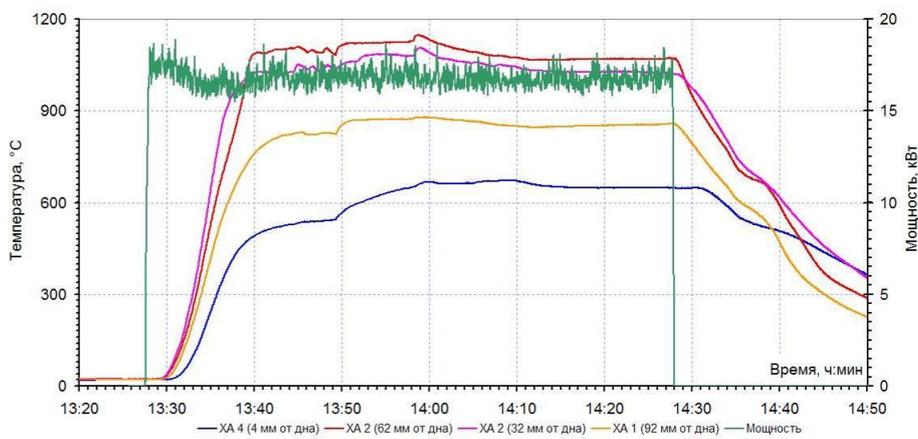


Рисунок 8. Графики изменения температуры в экспериментах

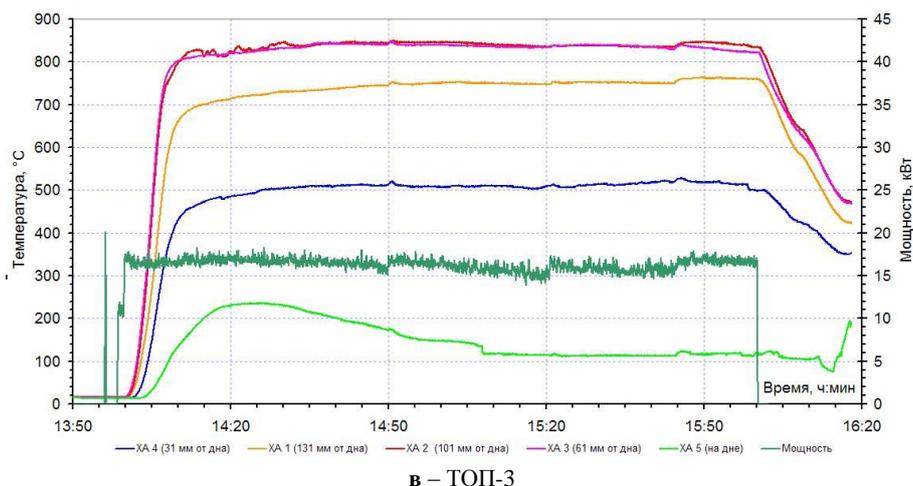


Рисунок 8. Графики изменения температуры в экспериментах

Материаловедческие исследования после эксперимента ТОП-3

Внешний вид поверхности разреза экспериментальной секции ТОП -3 приведен на рисунке 9а, где отчетливо видно что, наконечник плазматрона сохранил, в основном, рельеф образованный резьбой поверхностью. Часть слитка в торцевой области наконечника из-за повышенной хрупкости и слабой

фиксацией компаундом (серой) выкрошилась в процессе резки.

Из материала в зоне образования слитка были отобраны образцы для определения фазового состава методом рентгеновской дифрактометрии поликристаллов. Места отбора образцов приведены на рисунке 9б. Обозначение, краткая характеристика материала образца и качественный фазовый состав приведен в таблице 5.

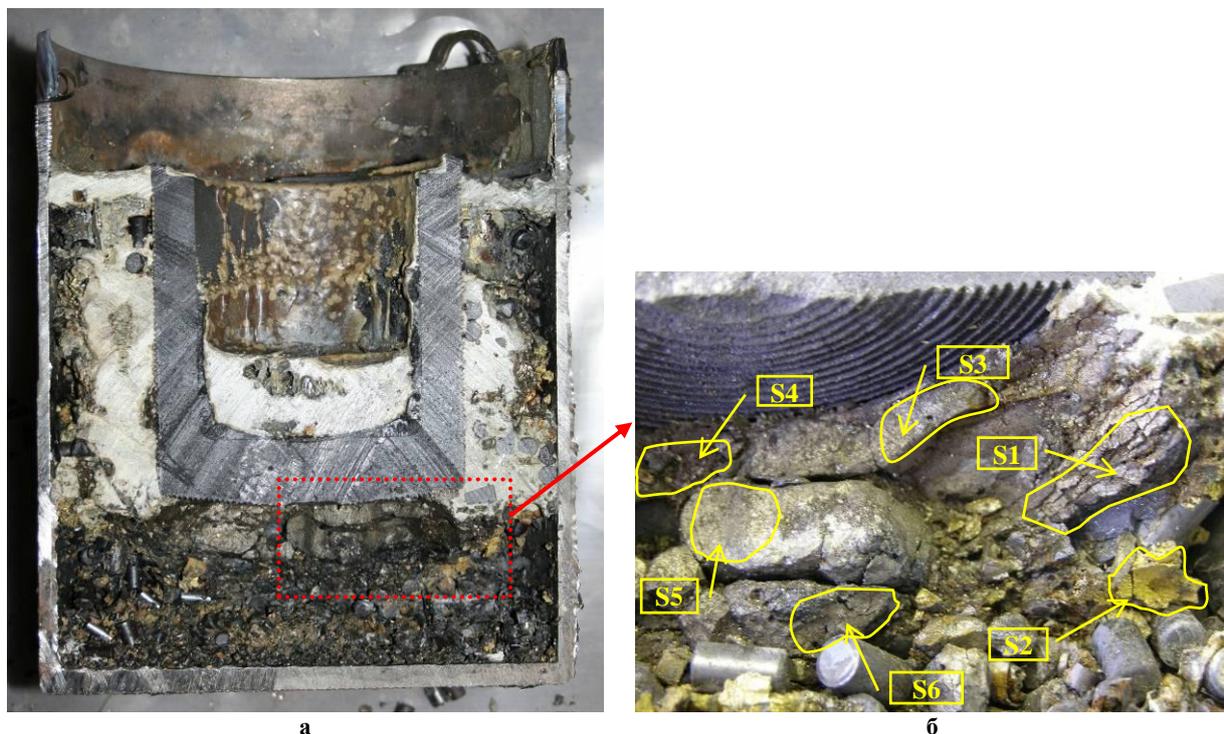


Рисунок 9. Вид поверхности разреза (а), места отбора образцов (б)

Таблица 5. Результаты качественного анализа фазового состава

№	Характеристика образца	Основные фазы, период решетки a_0 (нм)	Другие фаза
S1	Слоистый материал во внешней от плазматрона зоне слитка	$U_{-0.6}Zr_{-0.4}O_2$ (0,532); UO_2 (0,547); $Zr(O,C)$ (0,463) $Zr(N,O,C)$ (0,459); $(U,Zr)(C,O,N)$ (0,478)	ZrO_2 ; $\alpha-Zr(O)$
S2	Сплавленный материал циркониевой струж-	$Zr(N,O,C)$ (0,459)	$\alpha-Zr(O)$, $ZrO_2^{МКП}$

**ПОДДЕРЖИВАЮЩИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ В ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВА
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ В ПРОЕКТЕ INVECOR**

	ки желто-золотого цвета		$ZrO_2^{тепр}$, $ZrO_2^{кыб}$
S3	Цельный фрагмент материала в верхней части слитка	$(U_{-0,85}Zr_{-0,15}O_2 (0,543); Zr(O,C) (0,463))$	$\alpha-Zr(O)$;
S4	Рассыпчатый материал слитка	$(U_{-0,8}Zr_{-0,2}O_2 (0,542); (U,Zr)(C,O,N) (0,482); Zr(O,C) (0,463); Zr(N,O,C) (0,458))$	$\alpha-Zr(O)$; ZrO_2
S5	Цельный фрагмент материала из средней части слитка	$U_{-0,85}Zr_{-0,15}O_2 (0,543); Zr(O,C) (0,463)$	$\alpha-Zr(O)$
S6	Цельный фрагмент материала из нижней части слитка в области контакта с таблетками двуокиси урана	$UO_2 (0,547); U_{-0,8}Zr_{-0,2}O_2 (0,543); U_{-0,6}Zr_{-0,4}O_2 (0,533); Zr(O,C) (0,463)$	$\alpha-Zr(O)$
S7	Фрагмент покрытия с торца наконечника	$U_{0,6}Zr_{0,4}O_2 (0,543); (U,Zr)(C,O,N) (0,478); ZrC (0,469); Zr(O,C) (0,463); (Zr(N,O,C) (0,458))$	$ZrO_2^{мкп}$, $ZrO_2^{тепр}$, $ZrO_2^{кыб}$

В общем случае, последовательность фаз в ячейках таблице соответствует уменьшению интенсивности их рефлексов на дифрактограммах, а следовательно, и их объемного содержания в образцах.

Как видно из результатов фазового анализа, основными фазами, характерными для областей сборки, где произошло плавление материала шихты во время эксперимента, являются керамические оксидная фаза типа $(U, Zr)O_2$ с ГЦК решеткой двуокиси урана и условная оксикарбидная фаза $(Zr_xU_{1-x})(O, C, N)_{1-y}$ с ГЦК решеткой карбида циркония.

Состав оксидной фазы варьируется от фаз исходных двуокисей урана и циркония до растворов с приблизительным составом $U_{-0,6}Zr_{-0,4}O_2$. Также в фазовый состав материала фрагментов слитка входит значительное количество фазы $\alpha-Zr(O)$.

В образцах слоистого материала на периферии зоны плавления состав оксидной фазы сдвинут в сторону большего содержания циркония. Значения параметра решетки фазы в этих образцах составляет 0,535 нм до 0,530 нм, что соответствует составам от $U_{-0,6}Zr_{-0,4}O_2$ до $U_{-0,4}Zr_{-0,6}O_2$. Образец S6 из нижней части слитка, включающий видимые фрагменты таблеток двуокиси урана, содержит непрерывный набор составов оксидной фазы от двуокиси урана, один из максимумов которого сдвинут в область состава до $U_{-0,4}Zr_{-0,6}O_2$.

Отличительной особенностью фазового состава материала образцов этого эксперимента является присутствие фазы с ГЦК решеткой, параметр которой варьируется в пределах от 0,483 нм до 0,478 нм. Близкие значения параметра решетки имеют оксид урана UO_2 , нитрид урана UN и карбид урана UC . Меньшие значения параметра решетки фазы в образцах указывает на существование твердого раствора состава $(U,Zr)(C,O,N)$ с большим содержанием урана. Об этом свидетельствует также большая полуширина линии этой фазы на дифрактограммах образцов.

Необходимо отметить, что сходная картина фазового состава материала наблюдалась в образцах из слитка расплава, полученного в маломасштабном эксперименте по плавлению такой же шихты в модельных тиглях с покрытием из карбида циркония в атмосфере аргона с высоким содержанием азота (~20%). Присутствие фазы $(U,Zr)(C,O,N)$ также было характерно для хрупкого материала слитка и прослоек материала на границе с графитом тигля. В связи с тем, что заметной деградации стенок тигля после эксперимента не наблюдалось, сделано предположение о высоком относительном содержании азота в данном материале.

Исследования состояния покрытия

Для выяснения состояния покрытия после испытания из эксперимента ТОП-2 были отобраны образцы покрытия. К тому же в этом эксперименте не проводилось диаметрального разреза ЭУ, что позволило визуально наблюдать состояние значительной части поверхности наконечника плазматрона (рисунок 10).

Как показал результат фазового анализа фрагментов покрытия, кроме основных карбидных фаз в образцах присутствуют фазы $Zr(O, N, C)_y$ с периодом ГЦК решетки около 0,458 нм которые и придает характерный желтый и золотистый оттенки материалу покрытия, а также фрагментам не расплавленного циркония шихты.

Положительным моментом наблюдаемым в экспериментах серии ТОП - эффект заполнения пор таблетки UO_2 расплавом циркония, что в виду развитой границы контакта способствует последующему более быстрому образованию жидкой фазы раствора $(U,Zr)O_2$. На рисунке 11 показана поверхность шлифа таблетки (темная фаза) двуокиси урана в контакте с цирконием (светлая фаза).



Рисунок 10. Поверхность наконечника нижняя часть (а), верхняя часть (б)

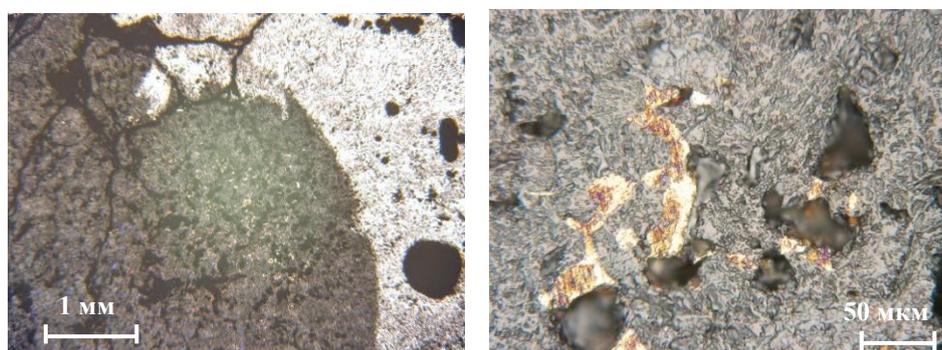


Рисунок 11. Микроструктура таблетки двуоксида урана, пропитанной цирконием

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение скорости эрозии графитовых наконечников плазматронов показало возможность выполнения экспериментов по программе INVECOR на протяжении более 2 часов в случае применения графитов марок АРВ-1 и R4340.

Защитное покрытие из карбида циркония на внешней поверхности графитового наконечника плазматрона показало высокую надежность по отношению к оксидным компонентам кориума при температуре выше 2500°C.

Экспериментально обосновано применение теплоизоляционного слоя из стеклоткани для получения температуры в зоне взаимодействия кориум/сталь, требуемой сценарием полномасштабных экспериментов.

В целом результаты выполненных поддерживающих экспериментов доказали техническую возможность реализации требуемых режимов для исследования процессов при удержании расплава кориума в корпусе реактора в экспериментальной установке ЛАВА-Б.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чиркин, В.С. /Теплофизические свойства материалов ядерной техники// М. : Атомиздат, 1968. – 484 с.
2. Особо тугоплавкие элементы и соединения/ Р.Б. Котельников, С.Н. Башлыков, З.Г. Галиакбаров, А.И. Каштанов // Справочник. – М. : Металлургия, 1969. – 376 с.
3. Жданов, В.С. " Изучение способов защиты графитового тигля от эрозии при плавлении тугоплавких оксидных материалов" / В.С. Жданов, В.В. Бакланов, И.М.Кукушкин // Вестник НЯЦ РК. - Вып. 2, май 2003.
4. Жданов, В.С. Экспериментальное изучение способов ограничения взаимодействия компонентов кориума с углеродом / В.В. Бакланов, В.С. Жданов, Е.В. Малышева // Вестник НЯЦ РК. - Вып. 1. - март 2004. - С. 75-85.
5. Behavior of the Corium Melt Pool in LWR Lower Head with External Cooling / V.G. Asmolov et al // RASPLAV Final Report, Russian Research Center «KURCHATOV INSTITUTE», OECD RASPLAV Project. – Moscow. - 2000.

**INVECOR ЖОБАСЫНДАҒЫ ҚАЛДЫҚ ЖЫЛУ БӨЛІНУДІ МОДЕЛЬДЕУГЕ АРНАЛҒАН
ҚҰРЫЛҒЫНЫҢ КОНСТРУКЦИЯСЫН НЕГІЗДЕУДЕГІ СҮЙЕМЕЛДЕУШІ ЭКСПЕРИМЕНТТЕР**

¹⁾Бакланов В.В., ¹⁾Жданов В.С., ¹⁾Малышева Е.В., ¹⁾Кукушкин И.М.,
¹⁾Игнашев В.И., ¹⁾Кукушкин М.И., ¹⁾Микиша А.В., ²⁾Зверев В.В.

¹⁾*ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан*
²⁾*Қазақстан Республикасының Ұлттық Ядролық Орталығы, Курчатов*

Қысым астында реактор корпусында сумен белсенді белдеу қорытындысын ұстап қалу кезінде корийум бассейнде зерттеу барысы бойынша эксперименттерді орындау кезінде қолданылатын, "ЛАВА-Б" қондырғысының бөлек тораптарын жұмысқа қабылеттілігін негіздеуде қолдайтын эксперименттер сипатталған. Эксперименттердің бірінші тобында физика- химиялық «корийум/болат» әрекеттестігі үшін шартты құру үшін реактор корпус моделін ішкі бетінде жылылықты өткізбеу пакет материалдарын таңдау іске асырылады. Эксперименттердің екінші тобы корийумда қалдық жылу шығаруды ұқсастыру үшін қондырғыда қолданылатын коаксикальды плазматрондардың графитті ұшының ішкі бетіне қорғау жабынын тасу технологиясын өндеуге арналған. Интегралды эксперименттердің үшінші тобында корпус моделін ішкі бетінде жылылықты өткізбеу пакеттің тиімділігін бағалау және де С-32 құрамының корийумына сәйкес, белсенді белдеу материалдар араласында коаксикальды плазматрондың ұзақ төзімі үшін графит бетінде қорғау жабынын тиімділігін тексеруі орындалды. Орындалған эксперименттер 2 сағат ішінде 18 кВт жоғары қуатта коаксикальды плазматрондар графитті ұштарымен жұмыс кезінде жабынның сенімділігін растады. Жылылықты өткізбеу пакеттің таңдалған конструкциясы физика- химиялық «корийум/болат» әрекеттестігінің басталуы үшін жеткілікті, сонымен бірге 850 °С жоғары температураға жетуін рұқсат етті.

**EXPERIMENTS TO JUSTIFY STRUCTURE OF RESIDUAL
HEAT SIMULATION ASSEMBLY UNDER INVECOR PROJECT**

¹⁾V.V. Baklanov, ¹⁾V.S. Zhdanov, ¹⁾Ye.V. Malysheva, ¹⁾I.M. Kukushkin,
¹⁾V.I. Ignashev, ¹⁾M.I. Kukushkin, ¹⁾A.V. Mikisha, ²⁾V.V. Zverev

¹⁾*Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*
²⁾*National Nuclear Centre of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov*

Supporting experiments in a substantiation of efficiency of separate units of "LAVA-B" facility used at performance of experiments on research of processes in corium pool at core melt retention in the reactor pressure vessel of RPW are described. In the first group of experiments the choice of materials of thermal insulating package on an external surface of reactor pressure vessel model for creation of conditions for physical and chemical interaction "corium/steel" has been carried out. The second group of experiments has been devoted of the technology working off of application of a protective coating on an external surface of graphite nozzles of coaxial plasmatrons used in the device for imitation of decay heat in corium. In the third group of integral experiments check of efficiency of a protective coating on a graphite surface has been executed at long endurance of coaxial plasmatrons in a mix of core materials corresponding to corium C-32, and also an estimation of thermal insulating package efficiency on an external surface of a reactor pressure vessel model. The executed experiments have confirmed reliability of a protective coating at work of coaxial plasmatrons with a graphite nozzles with power over 18 kW during 2 hours. The chosen design of a thermal insulating package has allowed to reach thus temperatures more than 850 °C, that it is enough to start of physico-chemical interaction "corium/steel".

УДК 550.34

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЬЦЕВОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЗНЫХ ДИАПАЗОНАХ ГЛУБИН ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ И СИЛЬНЕЙШИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ

^{1,2)}Копничев Ю.Ф., ¹⁾Соколова И.Н.

¹⁾Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

²⁾Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Изучены характеристики сейсмичности перед восемью сильными и сильнейшими неглубокими землетрясениями в зонах субдукции (районы Суматры, Новой Британии, Мексики, Хоккайдо, Перу), а также в двух зонах района Камчатки, где почти 100 лет не было событий с $M_s \geq 8.0$. Рассмотрены данные о землетрясениях в двух диапазонах глубин: 0 – 33 км и 34 – 70 км. Установлено, что на глубинах обоих диапазонов перед сильными землетрясениями формировались кольцевые структуры сейсмичности. Эпицентры главных событий находились вблизи от областей пересечения или наибольшего сближения колец «мелких» и «глубоких» событий. Аналогичные структуры выделены в двух зонах района Камчатки, что позволяет предполагать подготовку здесь сильных землетрясений с $M \sim 8$. Предлагается интерпретация обнаруженных эффектов, связанная с миграцией глубинных флюидов.

ВВЕДЕНИЕ

В различных районах земного шара перед сильными землетрясениями часто появляются кольцевые структуры сейсмичности, оконтуривающие области относительного сейсмического затишья [1, 2]. Эти данные имеют значение для решения проблем сейсморайонирования и среднесрочного прогноза землетрясений, однако природа кольцевых структур не установлена.

При анализе кольцевых структур в зонах субдукции до сих пор, как правило, не проводилось дифференциации сейсмичности по глубине. Так, например, К. Моги [1] рассматривал все очаги землетрясений с глубинами до 80 км. В данной статье проводится более детальное изучение сейсмичности с учетом глубины событий для районов очагов 8 сильных и сильнейших землетрясений в зонах субдукции. Кроме того, по аналогии с полученными данными в районе Камчатки выделяются зоны, аномальные по характеристикам сейсмичности, кото-

рые, возможно, связаны с подготовкой сильных сейсмических событий.

МЕТОДИКА И ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Рассмотрены характеристики сейсмичности для разных участков зоны Бенюфа в диапазонах глубин 0 – 33 и 34 – 70 км. Анализировались данные о землетрясениях, произошедших в окрестностях будущих очаговых зон, с магнитудами $M \geq M_{п1}$ и $M \geq M_{п2}$, где $M_{п1}$ варьировалось от 5.0 до 5.5 (для первого) а $M_{п2}$ от 4.5 до 5.5 для второго диапазона глубин (таблица 1). При этом выбирался временной интервал, как правило, с 01.01.1973 до дня, предшествовавшего главному событию. Обработаны данные о сейсмичности перед 8 сильными и сильнейшими неглубокими землетрясениями с $M_w = 7.6 - 9.0$ в районах Суматры, Новой Британии, Мексики, Хоккайдо и Перу, а также в районах центральной и северной Камчатки, где в течение примерно 100 лет не было событий с $M_s \rightarrow 8.0$ (таблица 1).

Таблица 1. Характеристики кольцевой сейсмичности перед сильными землетрясениями

Дата	Широта, град.	Долгота, град.	h, км	Mw	L, км	Mп1	l, км	Mп2	Район
04.06.2000	-4.72	102.09	7	7.9	150	5.5	70	5.5	Суматра
17.11.2000	-5.50	151.78	37	7.8	110	5.5	45	5.5	Нов. Британия
22.01.2003	18.77	-104.10	9	7.6	200	5.0	110	4.5	Мексика
25.09.2003	41.82	143.91	13	8.3	85	5.0	40	5.0	Хоккайдо
26.12.2004	3.30	95.98	30	9.0	700	5.5	200	5.5	Суматра
28.03.2005	2.09	97.11	21	8.6	190	5.0	190	5.0	Суматра
15.08.2007	-13.39	-76.60	39	8.0	170	5.0	65	5.0	Перу
12.09.2007	-4.44	101.37	34	8.5	290	5.0	100	5.0	Суматра

Примечание: L и l – большие оси «мелкого» и «глубокого» колец, соответственно

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Суматра. Для этого района получено наибольшее количество данных. На рисунке 1 представлены карты сейсмичности в районе очага землетрясения 4 июня 2000 г. ($M_w = 7.9$). Отобраны землетрясения за период 01.01.1973 – 03.06.2000 ($M \geq 5.5$). Видно, что неглубокие события ($h \leq 33$ км) сформировали вдоль

береговой линии, в частности, кольцевую структуру с большой осью длиной $L \sim 150$ км. Землетрясения с промежуточной глубиной очагов ($h = 34 - 70$ км) образовали кольцо меньшего размера ($l \sim 70$ км), расположенное на северо-западной окраине неглубокого кольца. При этом эпицентр главного события находится вблизи от области пересечения этих кольце-

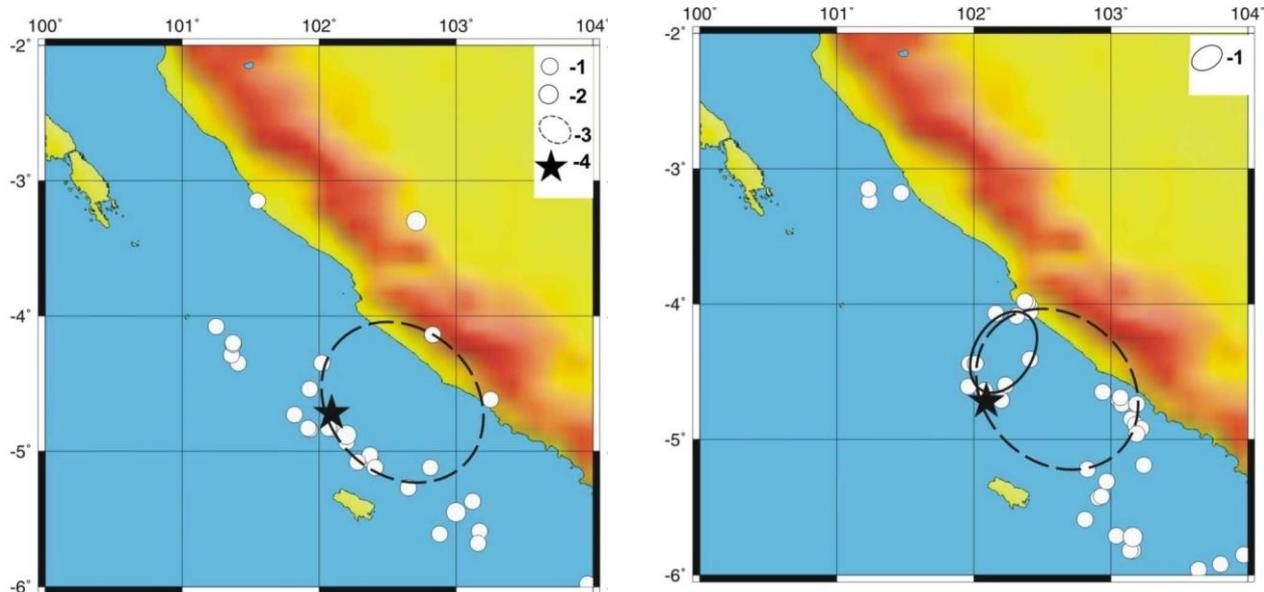
**ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЬЦЕВОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЗНЫХ ДИАПАЗОНАХ ГЛУБИН
ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ И СИЛЬНЕЙШИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ**

вых структур (далее, для краткости кольца первого диапазона глубин будут называться «мелкими», а второго – «глубокими»).

На рисунке 2 представлена сейсмичность в очаговой зоне Великого Суматринского землетрясения 26 декабря 2004 г. ($M_w=9.0$), вызвавшего грандиозное цунами в Индийском океане, которое привело к большому человеческим жертвам.

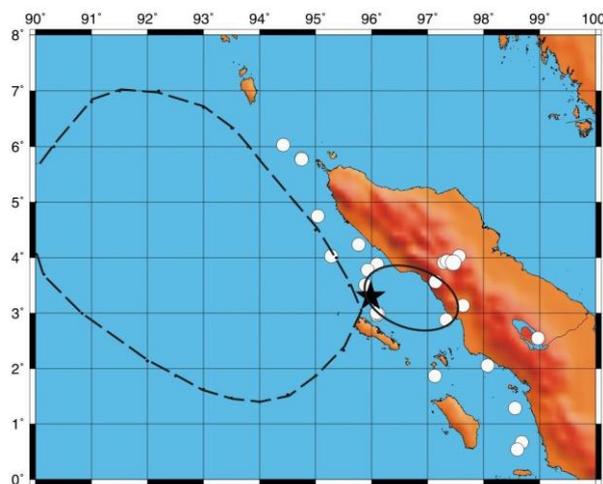
В [3] показано, что землетрясения с $M \geq 5.5$ за период 01.01.1969 - 25.12.2004 сформировали мелкое кольцо с большой осью размером ~ 700 км, ориентированное параллельно простиранию о. Суматра. Существенно, что большая часть этого кольца относится к океанической плите. В интервале времени

01.01.1973 - 25.12.2004 образовалось также глубокое кольцо ($M \geq 5.5$) с большой осью длиной ~ 200 км, вытянутое в субширотном направлении. При этом эпицентр главного события расположен в области наибольшего сближения кольцевых структур. Следует отметить, что в данном случае за тот же период времени сформировалось еще одно мелкое кольцо сейсмичности ($M \geq 5.5$) в северной части очаговой зоны, ориентированное в субмеридиональном направлении, с большой осью длиной ~ 370 км (рисунок 3). В то же время здесь не проявилось глубокое кольцо (по крайней мере, для событий с $M \geq 5.0$, - рисунок 3б).



Эпицентры сильных землетрясений: 1 – $5.5 \leq M < 6.5$, 2 – $M \geq 6.5$. 3 – мелкое кольцо, 4 – эпицентр землетрясения 04.06.2000; 1(б) – глубокое кольцо
а – (0 – 33) км **б** – (34 – 70) км

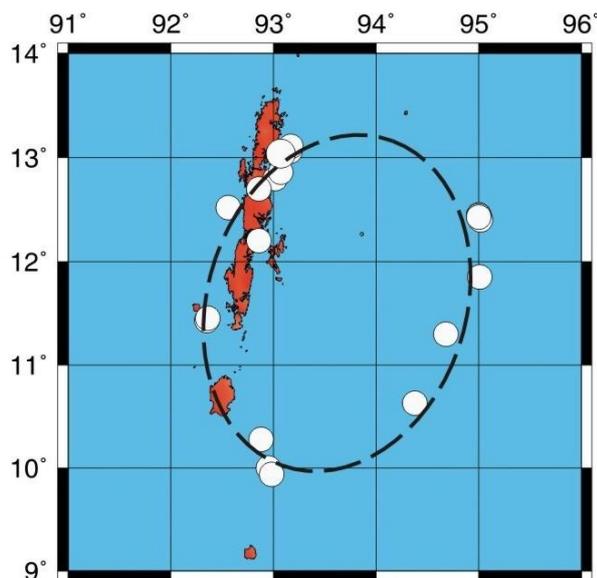
Рисунок 1. Кольцевая сейсмичность перед Суматринским землетрясением 04.06.2000 для глубин событий



Обозначения - на рисунке 1

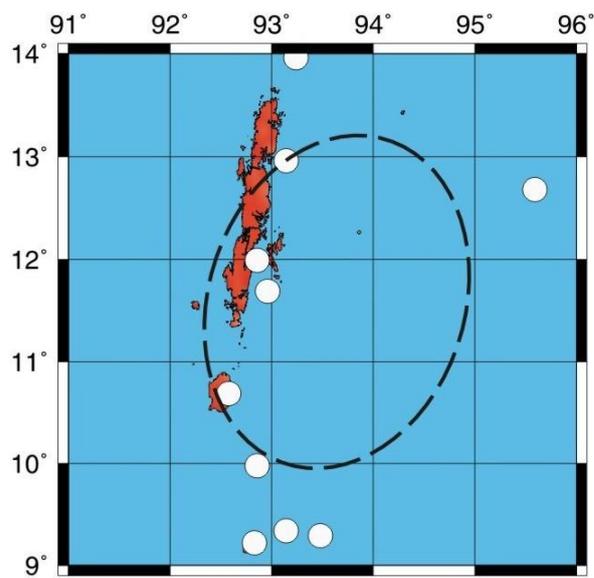
Рисунок 2. Кольцевая сейсмичность перед Суматринским землетрясением 26.12.2004

**ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЬЦЕВОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЗНЫХ ДИАПАЗОНАХ ГЛУБИН
ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ И СИЛЬНЕЙШИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ**



Остальные обозначения - на рисунке 1

а



кружки соответствуют $5.0 \leq M \leq 5.9$.
Остальные обозначения - на рисунке 1

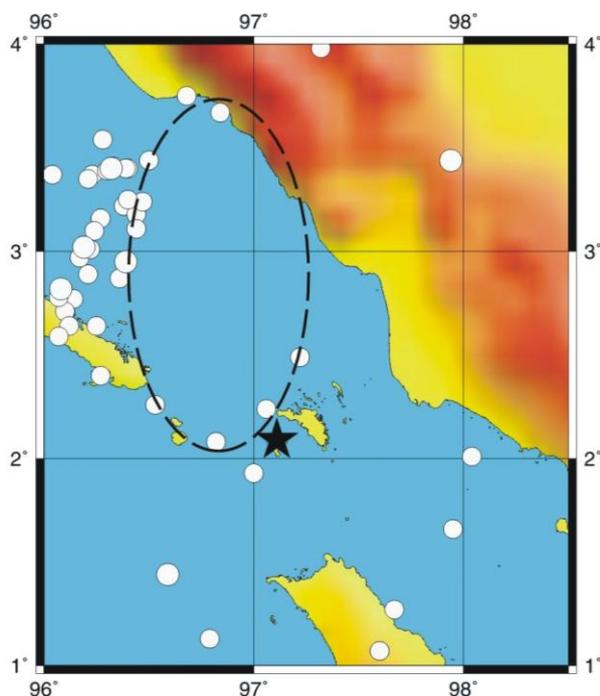
б

Рисунок 3. Кольцевая сейсмичность перед Суматринским землетрясением 26.12.2004 (северная часть очаговой зоны)

Рисунок 4 иллюстрирует особенности сейсмичности в районе очага землетрясения 28 марта 2005 г. ($M_w=8.6$), произошедшего к югу от очага землетрясения 26.12.2004. Эпицентры землетрясений с $M \geq 5.0$ в период времени с 01.01.1973 по 27.03.2005 сформировали два кольца: мелкое и глубокое прак-

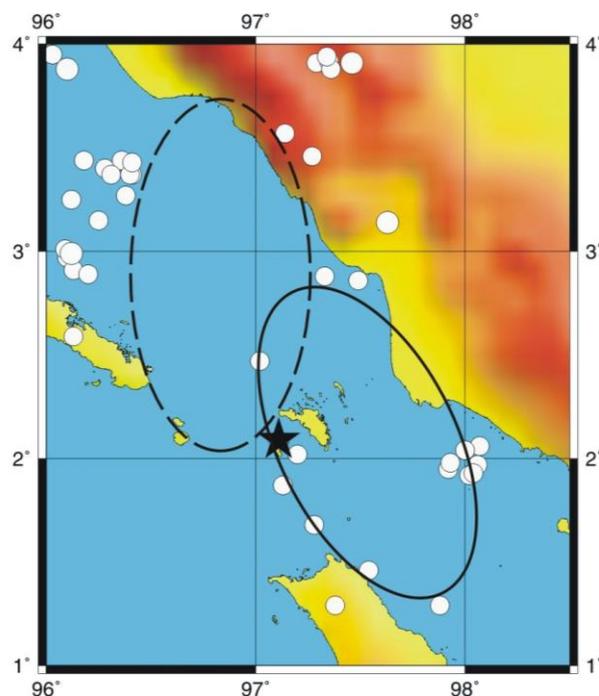
тически одинаковых размеров (с большими осями ~190 и ~180 км, соответственно).

Оба кольца расположены между желобом и вулканическим фронтом. Существенно, что эпицентр главного события находился вблизи области пересечения этих колец.



Маленькие кружки - $5.0 \leq M \leq 5.9$, большие - $M \geq 6.0$. Остальные обозначения - на рисунке 1

а

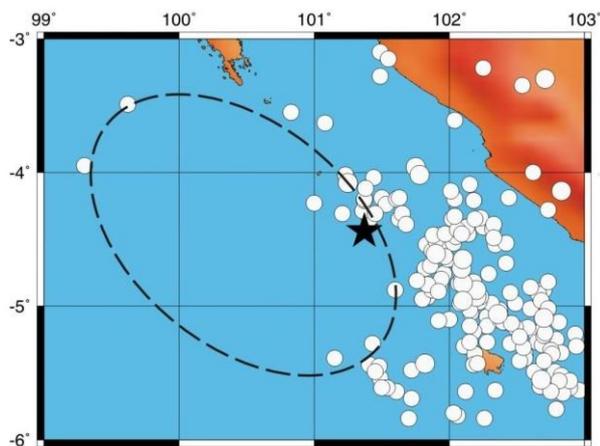


б

Рисунок 4. Кольцевая сейсмичность перед Суматринским землетрясением 28.03.2005

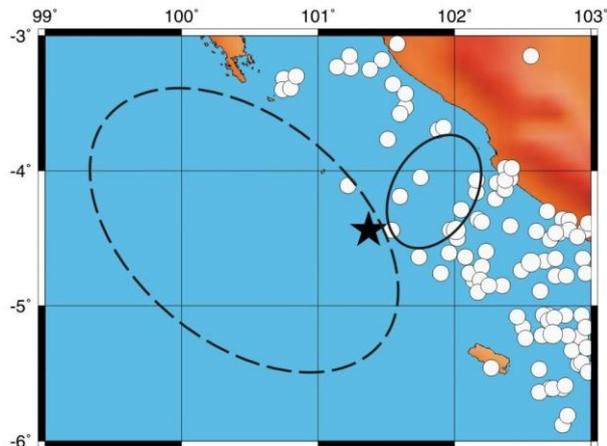
**ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЬЦЕВОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЗНЫХ ДИАПАЗОНАХ ГЛУБИН
ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ И СИЛЬНЕЙШИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ**

На рисунке 5 показана сейсмичность в окрестностях очага землетрясения 12 сентября 2007 г., произошедшего в районе южной Суматры. Здесь до 11.09.2007 сформировались мелкое (события с $M \geq 5.0$) и глубокое ($M \geq 5.0$) кольца с длинами больших осей соответственно ~ 290 и ~ 100 км. Мелкое кольцо вытянуто вдоль побережья, а глубокое кольцо ориентировано почти нормально к побережью. Обращает на себя внимание то, что эпицентр землетрясения 12.09.2007 снова попал в область, где практически соприкасаются кольца сейсмичности.



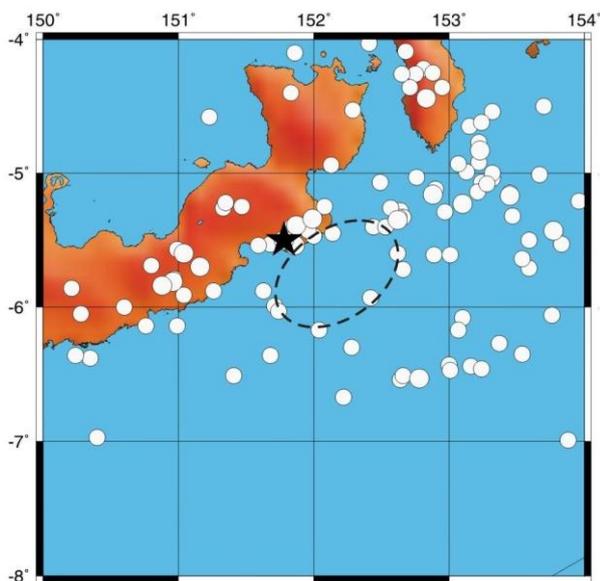
а

Обозначения - на рисунке 4



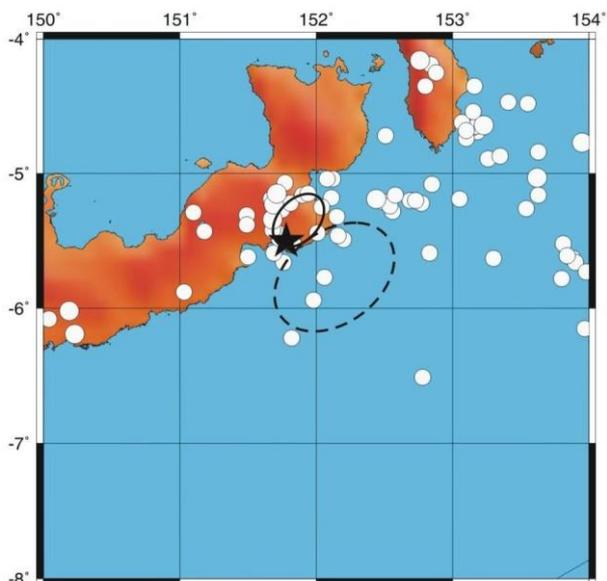
б

Рисунок 5. Кольцевая сейсмичность перед Суматринским землетрясением 12.09.2007.



а

Обозначения - на рисунке 4

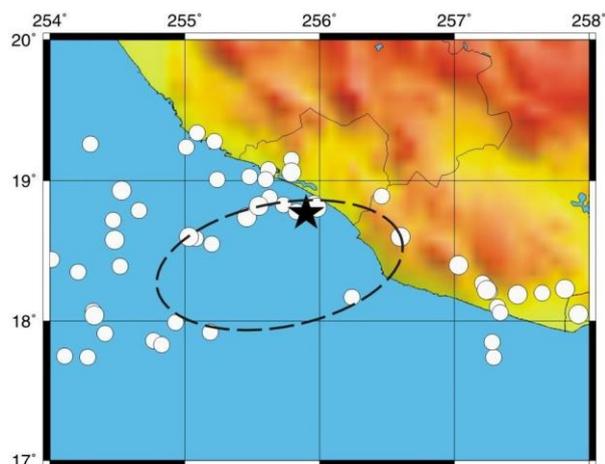


б

Рисунок 6. Кольцевая сейсмичность перед землетрясением в районе Новой Британии 17.11.2000

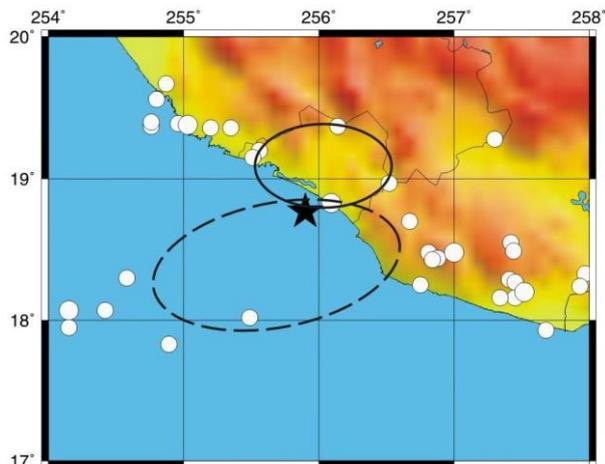
**ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЬЦЕВОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЗНЫХ ДИАПАЗОНАХ ГЛУБИН
ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ И СИЛЬНЕЙШИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ**

Мексика. Эпицентр землетрясения 21 января 2003 г. ($M_w=7.6$) находился в океане, к западу от г. Колима. Перед этим событием (начиная с 01.01.1973) сформировались мелкое ($M \geq 5.0$) и глубокое ($M \geq 4.5$) кольца с размерами больших осей ~ 200 и ~ 110 км, соответственно (рисунок 7). Большая часть мелкого кольца находится под океаном, но крайняя восточная его часть расположена под континентом. Глубокое кольцо почти полностью находилось под континентом. Эпицентр главного события снова соответствует области, где практически касаются мелкое и глубокое кольца.



маленькие кружки - $5.0 \leq M \leq 5.9$, большие - $M \geq 6.0$.
Остальные обозначения - на рисунке 1

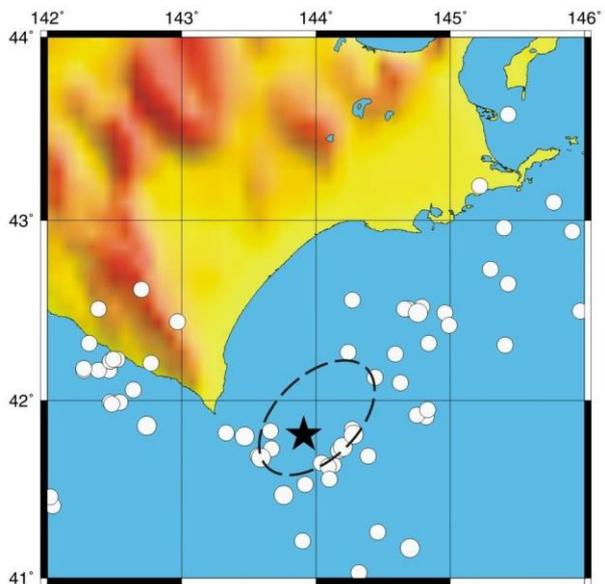
а



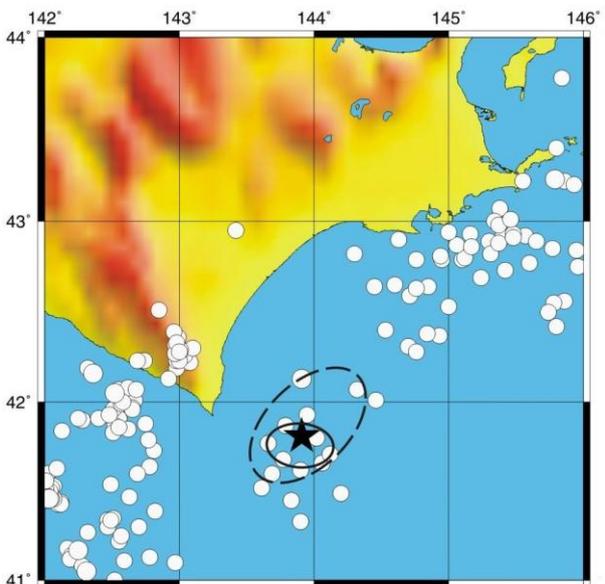
маленькие кружки - $4.5 \leq M \leq 5.9$, большие кружки - $M \geq 6.0$.
Остальные обозначения - на рисунке 1

б

Рисунок 7. Кольцевая сейсмичность перед землетрясением в районе Мексики 22.01.2003



а



б

Обозначения - на рисунке 4

Рисунок 8. Кольцевая сейсмичность перед землетрясением в районе Хоккайдо 25.09.2003

**ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЬЦЕВОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЗНЫХ ДИАПАЗОНАХ ГЛУБИН
ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ И СИЛЬНЕЙШИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ**

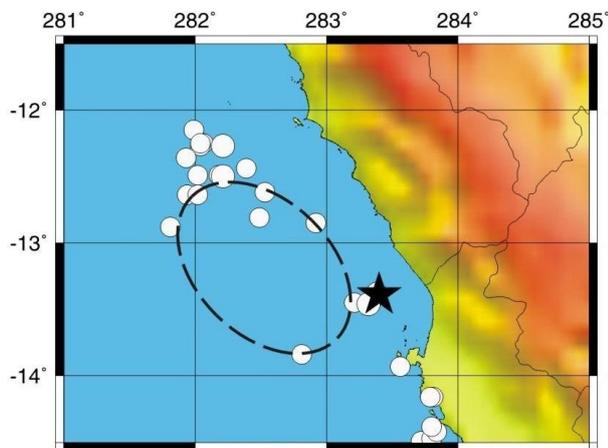
Перу. На рисунке 9 представлены результаты анализа сейсмичности в районе очага землетрясения 15 августа 2007 г. ($M_w=8.0$). В данном случае в период с 01.01.1973 по 14.08.2007 сформировались мелкое и глубокое кольца ($M \geq 5.0$) с размерами больших осей соответственно ~ 170 и ~ 65 км. Мелкое кольцо вытянуто почти параллельно побережью, а глубокое – примерно под углом 45° к большой оси мелкого. Интересно, что эпицентр землетрясения с $M_w=8.0$ расположен в области наибольшего сближения мелкого и глубокого колец.

Камчатка. Рассмотрены характеристики сейсмичности в районе Камчатки, где по долгосрочному прогнозу С.А.Федотова и др. [4] ожидаются сильные землетрясения с $M \sim 8$. В районах северной и центральной Камчатки, начиная с 1959 г. не было землетрясений с $M_s \geq 8.0$ [4,16]. Данные о сейсмичности в районе, ограниченном координатами $55.0^\circ - 56.5^\circ$,

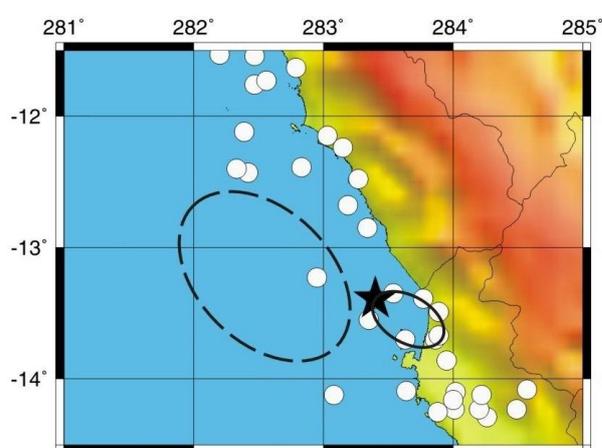
$161^\circ - 164^\circ$, за период 01.01.1973 - 01.08.2008 показаны на рисунке 10.

Как видно из рисунка 10, эпицентры мелких ($M \geq 5.0$) и глубоких ($M \geq 4.7$) событий сформировали кольца с размерами больших осей ~ 100 и ~ 80 км, соответственно. При этом, на северо-восточную окраину мелкого кольца попадает эпицентр землетрясения 15.12.1971 ($M_s=7.5$). Кольца пересекаются между 55.2° и 55.5° N.

Из рисунка 11 следует, что в районе центральной Камчатки в период с 01.01.1973 по 01.08.2008 сформировались мелкое и глубокое кольца сейсмичности ($M \geq 5.5$) с большими осями размерами ~ 100 и ~ 65 км, соответственно. Кольца пересекаются в области между 159.5° и 160.0° E (чуть южнее 53° N). В данном случае, возможно, формируется еще одно глубокое кольцо, практически совпадающее с мелким.



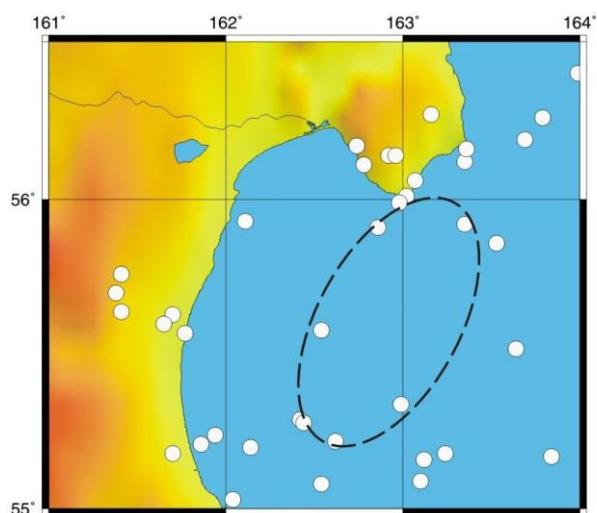
а



б

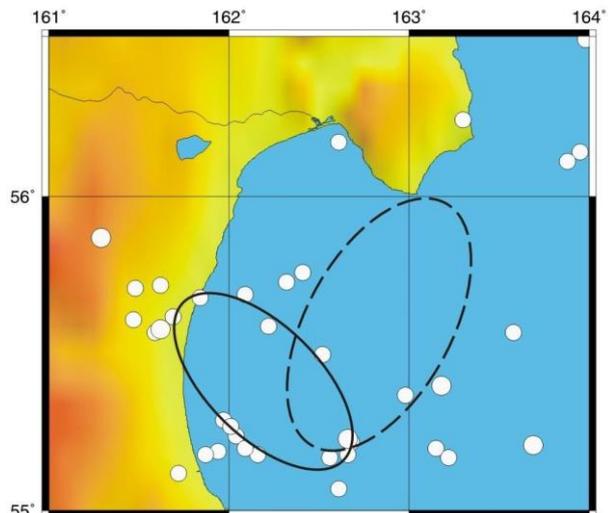
Обозначения - на рисунке 4

Рисунок 9. Кольцевая сейсмичность перед землетрясением в районе Перу 15.08.2007



маленькие кружки - $5.0 \leq M \leq 5.9$, большие - $M \geq 6.0$.
Остальные обозначения – на рисунке 1

а

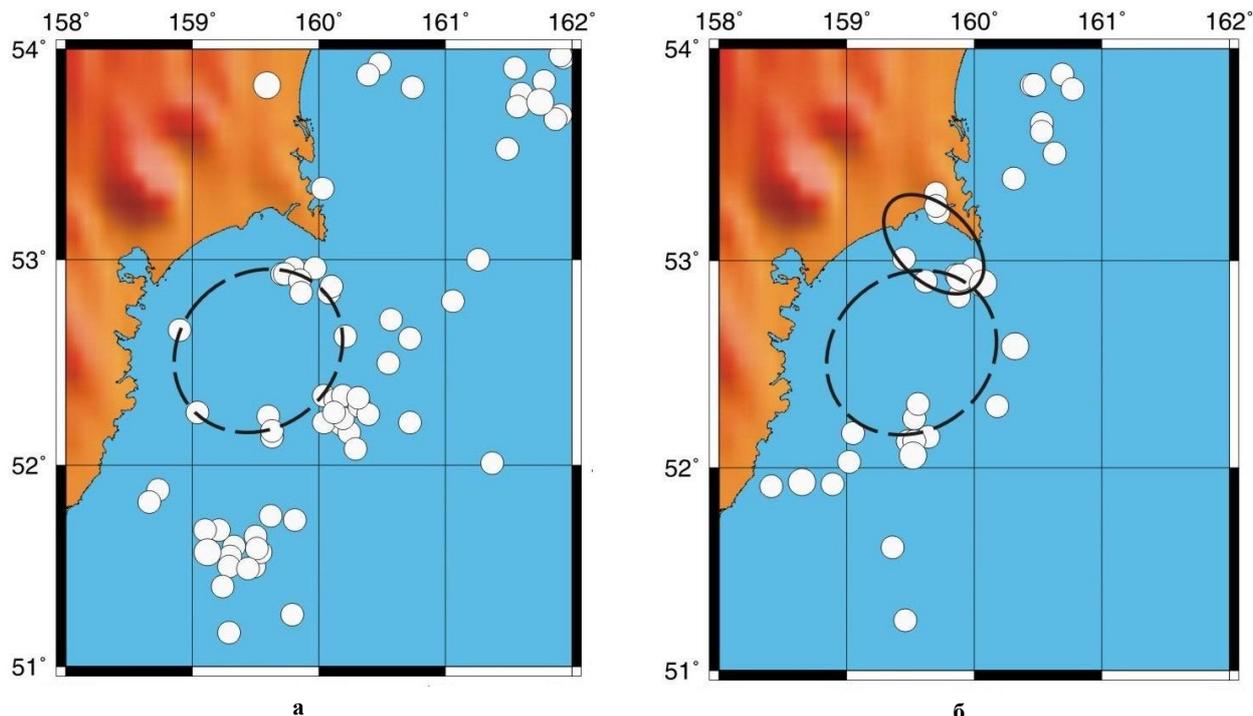


маленькие кружки – $4.7 \leq M \leq 5.9$, большие - $M \geq 6.0$.
Остальные обозначения – на рисунке 1

б

Рисунок 10. Кольцевая сейсмичность в районе северной Камчатки

**ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЬЦЕВОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЗНЫХ ДИАПАЗОНАХ ГЛУБИН
ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ И СИЛЬНЕЙШИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ**



Обозначения - на рисунке 1

Рисунок 11. Кольцевая сейсмичность в районе центральной Камчатки

В вышеприведенной таблице обобщены данные о размерах мелких и глубоких колец в рассмотренных районах. Видно, что величины L варьируются от 85 до 700 км, а величины l - от 40 до 200 км. Отношения L/l изменяются в интервале от 1.0 до 3.5, в среднем $L/l \sim 2.4$. В эти же диапазоны значений попадают величины L , l и L/l для двух рассмотренных районов Камчатки. Обращает на себя внимание, что разброс величин L и l (даже без учета данных для очага землетрясения 26.12.2004) достаточно большой. Полученные данные не выявляют зависимости этих величин от магнитуды главных событий.

Заканчивая анализ экспериментальных данных, отметим, что в рассмотренных районах кольцевые структуры на глубинах $\sim 71 - 150$ км перед сильными землетрясениями, как правило, не формировались.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют о том, что в зонах субдукции перед сильными и сильнейшими неглубокими землетрясениями формируются кольцевые структуры сейсмичности. Существенно, что такие структуры образуются в двух диапазонах глубин. В рассматриваемых районах мощность континентальной коры составляет в среднем около 30 км [5,6], поэтому в первом приближении можно считать, что мелкие кольца формируются в земной коре, а глубокие - в верхах мантии (главным образом - в мантийном клине). Важно отметить, что в восьми описанных случаях эпицентры сильных землетрясений попадают в области пересечения или наибольшего сближения колец сейсмичности.

В [3, 7] показано, что контурам мелких колец соответствует высокое поглощение короткопериодных поперечных сейсмических волн, в то же время внутри них наблюдается сравнительно слабое поглощение этих волн. Отсутствие современного вулканизма в районах колец говорит о том, что они не связаны с присутствием частично расплавленных пород. В связи с этим наиболее естественное объяснение обнаруженных эффектов может быть связано с миграцией глубинных флюидов. По-видимому, мелкие кольца оконтуривают относительно жесткие блоки, по границам которых и происходит подъем флюидов [3, 7]. Можно предполагать, что аналогичная ситуация имеет место и в районах глубоких колец. Сейсмичность по контурам глубоких колец, скорее всего, обусловлена охрупчиванием пород океанической коры и верхов мантии в результате процессов дегидратации [8, 9].

Ранее было отмечено [10], что в случае существования двухфазного слоя со связанной сетью трещин и пор, заполненной флюидами, на кровле слоя наблюдается концентрация напряжений. При этом величина избыточных напряжений растет с мощностью слоя. В рассмотренных случаях максимальные напряжения должны наблюдаться в областях, где граничат флюидные сети, соответствующие мелким и глубоким кольцам и имеет место наибольшая мощность двухфазного слоя. Это позволяет объяснить приуроченность эпицентров сильнейших землетрясений к областям пересечения или наибольшего сближения мелких и глубоких колец. В тех

случаях, когда кольца не пересекаются, флюидные сети могут соединяться в нижней коре, которая в сейсмоактивных районах, как правило, характеризуется высокой электропроводностью и сильным поглощением поперечных волн, что связывается с присутствием флюидов [11, 12]. Новые данные согласуются также с обнаруженным ранее эффектом подъема мантийных флюидов в земную кору после сильных и сильнейших землетрясений [13 - 15].

Интересно, что в очаговой зоне Великого Суматринского землетрясения, простирающейся с севера на юг примерно на 1400 км [3], выделены два протяженных неглубоких кольца сейсмичности – на юге и на севере (рисунок 4). В то же время глубокое кольцо, граничащее с мелким, проявилось только в южной части очаговой зоны, вблизи от эпицентра главного события. Можно полагать, что северное кольцо, которое связано с насыщением флюидами земной коры, играло вспомогательную роль – оно обеспечило уменьшение трения на северном участке разрыва и, в конечном счете, возможность подвижки в очаге такого гигантского размера.

Полученные результаты имеют существенное значение для целей сейсморайонирования и среднесрочного прогноза землетрясений. Особый интерес представляют данные для двух зон в северной и центральной Камчатке, где, по-видимому, идут ак-

тивные геодинамические процессы, связанные с подготовкой сильных землетрясений. Следует отметить, что выделенные кольцевые структуры сейсмичности в районе Камчатки находятся в зонах относительно высокой вероятности сильных землетрясений в ближайшие годы согласно долгосрочному прогнозу С.А.Федотова и др. [4].

Новые данные позволяют прогнозировать положение эпицентров будущих сильных землетрясений в этих районах, которые, скорее всего, будут располагаться около областей пересечения или наибольшего сближения мелких и глубоких колец. Это имеет значение для прогноза параметров сильных движений [17].

В дальнейшем для выделения кольцевых структур в областях подготовки сильных землетрясений, целесообразно дополнительно использовать характеристики поля поглощения короткопериодных поперечных волн [3, 7]. Это должно позволить более надежно картировать сейсмически активные районы, поскольку при использовании данных только по сейсмичности возможно выделение ложных кольцевых структур, так же как и ложных зон затишья [18].

*Авторы выражают признательность
Н.Н. Михайловой, д.ф.-м.н, за полезные замечания.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Mogi, K. Seismicity before and after large shallow earthquakes around the Japanese islands / K Mogi // *Tectonophysics*. – 1990. – Vol.175, No 1/3. – P. 1 – 33.
2. Соболев, Г.А. Основы прогноза землетрясений / Г.А.Соболев. – М.: Наука, 1993. – 313 с.
3. Копничев, Ю.Ф. Характеристики сейсмичности и поля поглощения S-волн в районе очага Суматринского землетрясения 26 декабря 2004 г. / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // *Докл. РАН*. – 2008. – Т. 422, № 5.
4. Федотов, С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на 2006 – 2011 гг. и успешный прогноз Средне-Курильского землетрясения 15.11.2006 г., Ms=8.2 / С.А. Федотов, А.В. Соломатин, С.Д. Чернышев // *Вулканология и сейсмология*. – 2007. – № 3, – С. 3 – 25.
5. Simoes, M. 3-D velocity structure of the crust and uppermost mantle in the north eastern Japan arc / M. Simoes [et al.] // *J. Geophys. Res.* – 2004. – Vol.109, No B10. – doi: 10.2929/2003JB002958.
6. Levin, V. Crust and upper mantle of Kamchatka from teleseismic receiver functions / V. Levin [et al.] // *Tectonophysics*. – 2002. – Vol.358, No 1 -4. – P. 233 – 265.
7. Копничев, Ю.Ф. О природе кольцевой сейсмичности перед сильными землетрясениями: связь с мантийными флюидами / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // В сб.: *Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геозеологические проблемы*. Бишкек. – 2008. – С. 331 – 335.
8. Nakajima, J. Anomalous low-velocity zone and linear alignment of seismicity along it in the subducted Pacific slab beneath Kanto, Japan: reactivation of subducted fracture zone? / J. Nakajima, A.Hasegawa // *Geophys. Res. Lett.* – 2006. – Vol.33. – L16309. – doi: 10.1029/2006GL026773.
9. Yamasaki, T. Double seismic zone and dehydration embrittlement of the subducting slab / T. Yamasaki, T. Seno // *J. Geophys. Res.* – 2003. – Vol.109. – N B4. – doi: 10.1029/2002JB001918.
10. Gold, T. Fluid ascent through the solid lithosphere and its relation to earthquakes / T. Gold, S. Soter // *Pageoph*. 1984/1985. – Vol. 122. – P. 492 – 530.
11. Ваньян, Л.Л. О природе электропроводности консолидированной коры / Л.Л. Ваньян, Р.Д. Хайндман // *Физика Земли*. – 1996. – № 4. – С. 5 – 11.
12. Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью / А.Б. Бакиров [и др.] // Бишкек: Илим, 2006. – 115 с.
13. Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации поля поглощения S-волн в очаговых зонах сильных землетрясений Тянь-Шаня / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // *Физика Земли*. – 2003. – № 7. – С. 35 – 47.
14. Husen, S. Postseismic fluid flow after the large subduction earthquake of Antofagasta, Chile / S. Husen, E. Kissling // *Geology*. – 2001. – Vol. 29. – No 9. – P. 847 – 850.

15. Гордиенко, Д.Д. Пространственно-временные вариации поля поглощения короткопериодных S-волн в очаговых зонах сильных и сильнейших землетрясений / Д.Д. Гордиенко, Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Доклады РАН. – 2006. – Т 408, № 2. – С. 238 – 242.
16. Burgmann, R. Interseismic coupling and asperity distribution along the Kamchatka subduction zone / R. Burgmann [et al.] // J. Geophys. Res. – 2005. – No B07. – doi: 10.1029/2005JB003648.
17. Копничев, Ю.Ф. Короткопериодные сейсмические волновые поля / Ю.Ф. Копничев. – М.: Наука. – 1985. – С. 176.
18. Rong, Yu. Seismic gaps and earthquakes / Yu. Rong, D. Jackson D. Ya. Kagan // J. Geophys. Res. – 2003. – No B10. – doi: 10.1029/2002JB002130.

СУБДУКЦИЯ ЗОНАЛАРЫНДА ҚАТТЫ ЖӘНЕ ӨТЕ ҚАТТЫ ЖЕРСІЛКІНУЛЕРДІҢ АЛДЫНДА ТЕРЕНДІГІНІҢ ӘР АУҚЫМЫНДА САҚИНАЛЫ СЕЙСМИКАЛЫЛЫҒЫНЫҢ СИПАТТАМАСЫ

^{1,2)} Копничев Ю. Ф., ¹⁾Соколова И. Н.

¹⁾*ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

²⁾*РФА О.Ю. Шмидт атындағы Жер физикасы институты, Мәскеу, Ресей*

Суматра, Жаңа Британия, Мексика, Хоккайдо, Перудін, сондай-ақ, 100 жылға таяу $M_s \geq 8.0$ бар оқиғалар болмаған Камчатка ауданының екі зонасындағы сегіз қатты және өте қатты ($M_w = 7.6 - 9.0$) субдукция зоналарындағы терең емес жерсілкінулердің алдындағы сейсмикалылығының сипаттамалары зерделенген.

Терендігінің екі ауқымындағы: 0-33 км., және 34-70 км., жерсілкінулер туралы деректері қаралған. Қатты жерсілкінулер алдында терендіктің екі ауқымында да сейсмикалылығының сақиналы құрылымдары қалыптастырылуы анықталған. Басты оқиғалардың эпиорталықтары «ұсақ» және «терең» оқиғалардың сақиналары қиылысқан немесе ең көп жақындаған белдемдеріне жақын болған. Ұқсас құрылымдар Камчатка ауданының екі зонасында анықталған, бұл $M \sim 8$ бар қатты жерсілкінулер дайындалуын жорамалдауына мүмкіндік береді. Табылған әсерлерін терендігі флюидтер жылыстауымен байланыстырылған пайымдауы ұсынылады.

CHARACTERISTICS OF RING SEISMICITY IN VARIOUS DEPTH RANGES PRIOR TO LARGE AND GREAT EARTHQUAKES IN SUBDUCTION ZONES

^{1,2)} Yu.F. Kopychev, ¹⁾I.N. Sokolova

¹⁾*Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

²⁾*O.Yu. Schmidt Institute of the Earth Physics RAS, Moscow, Russia*

Seismicity characteristics prior to 8 large and great ($M_w = 7.6-9.0$) shallow earthquakes, occurred in subduction zones during 2000 - 2007 (in regions of Sumatra, New Britain, Hokkaido, Mexico and Peru) and also in two zones near Kamchatka, where no events with $M_s \geq 8.0$ have been recorded since 1900 were investigated. Data on earthquakes in 2 depth ranges of 0-33 and 34-70 km were analyzed. It was found that in two depth ranges ring seismicity structures were formed prior to large earthquakes. Epicenters of large and great earthquakes were located close to the areas of intersection or most approach of the shallow and deep rings. Similar structures were revealed in 2 areas within Kamchatka region, which allowed supposing the preparation for strong earthquakes there with $M \sim 8$. An interpretation of the effects discovered is suggested based on juvenile fluids migration.

УДК 550.34

ВАРИАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ НА СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ: ЧАСТЬ 1. КОЭФФИЦИЕНТ ЛОДЕ-НАДАИ

¹Полешко Н.Н., ²Садыкова А.Б., ²Сыдыков А., ²Тимуш А.В., ²Хачикян Г.Я., ²Шацкилов В.И.

¹Сейсмологическая опытно-методическая экспедиция, МОН РК, Алматы, Казахстан

²Институт сейсмологии МОН РК, Алматы, Казахстан

Проанализирована взаимосвязь вариаций солнечной активности и/или интенсивности потока космических лучей и вида сейсмоструктурного деформирования земной коры Северо-Тянь-Шаньского региона. Обнаружены вариации сейсмоструктурных деформаций в 11-тилетнем цикле солнечной активности. Установлена зависимость выявленных закономерностей с особенностями глубинного строения и температурой активной мантии.

Выявление характера сейсмоструктурных деформаций [1, 2] в каждом конкретном регионе являются важной экспериментальной информацией о процессах внутри Земли. На территории Тянь-Шаня поле сейсмоструктурных деформаций (СТД) обусловлено в основном коллизией Евразийской и Индостанской литосферных плит. Однако это поле не остается постоянным, а испытывает пространственно-временные вариации, связанные с эндогенными и экзогенными процессами [3, 4].

Информационной основой изучения СТД явился сводный каталог механизмов очагов землетрясений (МОЗ), зарегистрированных на территории Казахстана и сопредельных районов за период с 1964 по 2005 годы. Для определения механизмов очагов землетрясений в качестве исходных использованы данные сейсмических станций сетей Сейсмологической опытно-методической экспедиции МОН РК, НЯЦ РК, КНЕТ (Бишкек), Опытно-методической сейсмологической экспедиции Института сейсмологии НАН Кыргызстана, Алтай-Саянской экспедиции РАН, Сейсмологического бюро Синьцзянь-Уйгурского автономного района КНР. Для сильных землетрясений привлечены данные сети IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology, США), бюллетени ИОЦ РАН (г. Обнинск) и др. Кроме того, для составления сводного каталога использованы публикации специализированных изданий [5 – 8].

Параметры сводного каталога МОЗ представлены в международном формате и обозначениях. Каталог содержит данные о механизмах очагов более 9000 событий 6–17 энергетических классов (К). Основная часть исследуемых землетрясений – это слабые сейсмические события (более 8000 событий 6–9 энергетических классов) и только 3% составляют землетрясения с $K \geq 12$.

Анализ поля СТД базируется на представлениях о сейсмоструктурных деформациях макроскопических объемов горных масс. Теоретические основы метода разработаны Ю.И. Ризниченко [1] и заключаются в том, что характер сейсмоструктурного деформирования земной коры обусловлен смещениями по разнонаправленным разрывам в очагах

землетрясений. Расчет среднего тензора деформаций проводится путем суммирования вклада каждого землетрясения, с учетом его сейсмического момента, в общую деформацию элементарного объема осреднения.

В количественном отношении поле СТД может быть охарактеризовано двумя коэффициентами: интенсивности СТД (χ) и Лодде-Надаи (μ). Первый из них определяется выражением

$$\chi = \sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2 \varepsilon_3 + \varepsilon_1 \varepsilon_3}$$

и отражает соответствие среднего механизма очага землетрясения совокупности индивидуальных механизмов. Коэффициент χ может принимать значения от 0 до 1. Коэффициент Лодде-Надаи (μ) определяется выражением

$$\mu = 2(\varepsilon_2 - \varepsilon_3) / (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) - 1$$

и характеризует вид сейсмоструктурной деформации, являясь важнейшим элементом для реконструкции деформированного состояния. Значения μ изменяются в пределах от -1 до $+1$.

Коэффициент интенсивности сейсмоструктурной деформации χ может служить оценкой качества используемых исходных данных. Принято считать, что значения $\chi < 0,2$ означают невысокую надежность полученных решений, в этом случае анализ данных оказывается не эффективным [9]. Для использованного нами каталога механизмов очагов землетрясений, значения χ были выше 0.2 во всем энергетическом диапазоне (за исключением нескольких кратковременных периодов). Это позволяет считать приведенные ниже результаты статистически достоверными.

Коэффициенты χ и μ рассчитаны для территории, ограниченной координатами $42,5^\circ\text{N} - 43,75^\circ\text{N}$ и $75^\circ\text{E} - 79^\circ\text{E}$, выделенной на рисунке 1 двумя жирными оранжевыми линиями. Район, где выявлен отклик характеристик СТД на вариации солнечной активности и (или) интенсивности космических лучей в 11-тилетнем солнечном цикле, очерчен тонкими штриховыми оранжевыми линиями.

ВАРИАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ
НА СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ: ЧАСТЬ 1. КОЭФФИЦИЕНТ ЛОДЕ-НАДАИ

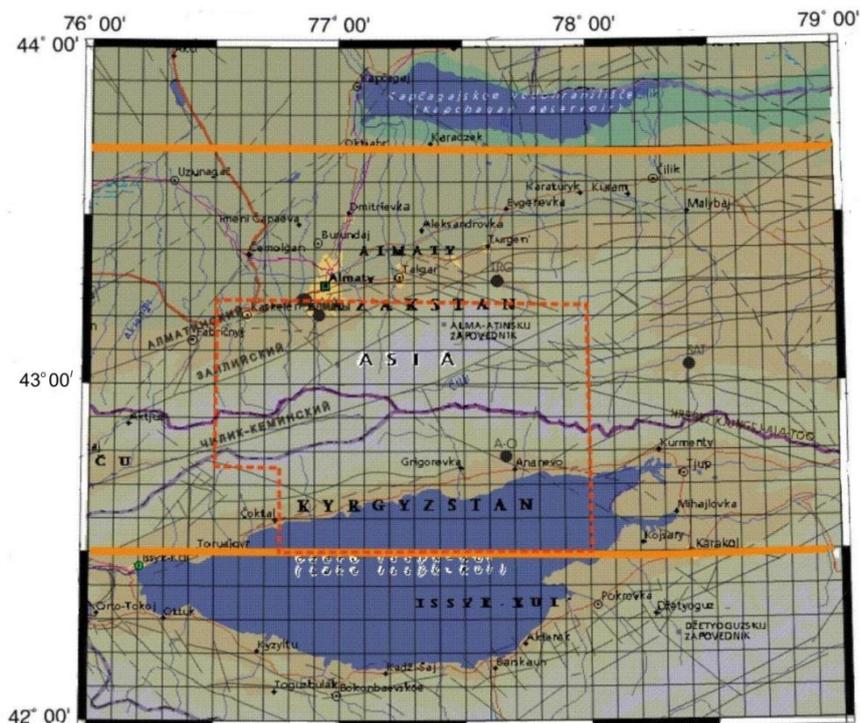


Рисунок 1. Район работ

Расчеты проведены за период наблюдений с 1980 г. по 2005 г. с использованием информационной базы автоматизированной системы SEISMO (НЯЦ РК) и программы Соболевой О.В. и Вахидовой З.М [10]. В процессе расчетов применен метод скользящего среднего с осредняющим интервалом в 36 месяцев и шагом 12 месяцев в трех энергетических диапазонах: $K \geq 9.6$; $7.5 < K \leq 9.5$ и $K \leq 7.5$. Полученные результаты расчетов использованы для выявления зависимости коэффициента Лодде-Надаи μ от вариаций солнечной активности и интенсивности

потока космических лучей в 11-тилетнем солнечном цикле и приведены ниже.

На рисунке 2 (кривые а) приведены значения коэффициента μ , вычисленные по механизмам очагов слабых $K=6-7$ (треугольники) и всех $K=6-9$ (круги) землетрясений в исследуемом районе для территориальных ячеек размером $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ с шагом скольжения $0,25^\circ$. Временной интервал осреднения составлял 12 месяцев, шаг скольжения - 6 месяцев. Результаты расчетов по всем ячейкам усреднены.

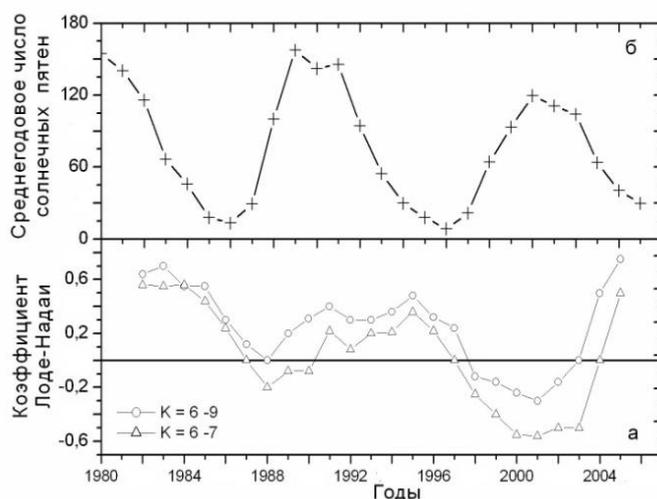
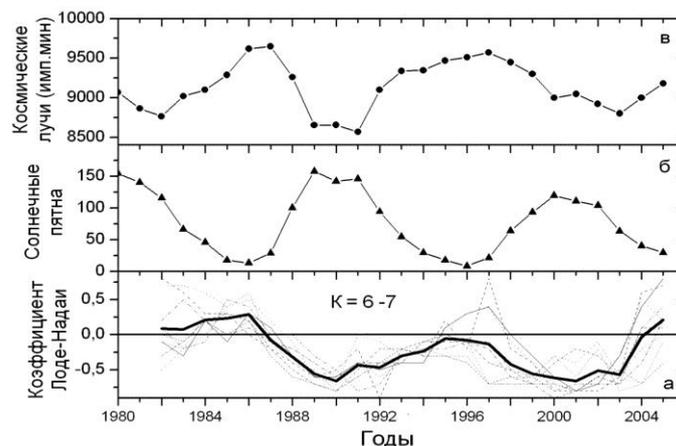


Рисунок 2. Территория, ограниченная координатами $42,5^\circ \text{N} - 43,75^\circ \text{N}$ и $75^\circ \text{E} - 79^\circ \text{E}$. Сопоставление распределения во времени коэффициента Лодде-Надаи (кривые а) со среднегодовым числом солнечных пятен W (кривая б)

На рисунке 2 (кривая б) показано также изменение числа солнечных пятен (число Вольфа W) за те же годы. Сопоставление временного распределения параметров μ и W , приведенное на рисунке 2, позволяет отметить тенденцию к противофазности их вариаций. Видно, что в периоды пониженной солнечной активности (1984–1987 гг., 1994–1997 гг. и 2004–2006 гг.) в регионе доминировали сжимающие напряжения (положительные значения μ), а в периоды высокой солнечной активности (1990–1991 гг. и 2000–2001 гг.) уменьшается влияние сжимающих напряжений и происходит переход от одноосного сжатия к сдвигу и растяжению (значения μ отрицательные). Эта особенность лучше видна по землетрясениям низкого энергетического класса $K=6-7$ (кривая с треугольниками), статистика которых является более достоверной.

Чтобы выяснить, повсеместно ли на исследуемой территории наблюдается связь коэффициента μ с солнечной активностью, проанализированы временные вариации коэффициента Лоде-Надаи в каждой из элементарных ячеек отдельно. Анализ показал,

что четкая связь имеет место только для 9 элементарных ячеек, расположенных в центральной части исследуемой территории и очерченных на рисунке 1 тонкими штриховыми оранжевыми линиями (координаты 42.50N–43.750 N, 75.000E–79.000 E). Для элементарных ячеек вне этой зоны связь между 11-летними вариациями μ и W либо выражена очень слабо, либо вообще отсутствует, что говорит о том, что в вариации μ , усредненные для всей территории (рисунок 2), основной вклад внесли вариации в этих 9 ячейках. На рисунке 3 приведены вариации коэффициента Лоде-Надаи μ , рассчитанные по механизмам очагов землетрясений с $K=6-7$ в каждой из 9 ячеек (тонкие кривые а) по данным высокогорной станции Тянь-Шань за 1980–2005 гг. и усредненные значения μ для 9 ячеек (жирные кривые а). На этом же рисунке приведены среднегодовые числа солнечных пятен (кривая б) и интенсивность нейтронной компоненты космических лучей (кривая в).



Линии графика коэффициент Лоде-Надаи: тонкие – для каждой из 9 территориальных ячеек; жирная – для усредненных значений

Рисунок 3. Территория, ограниченная координатами: 42.50N–43.750 N, 75.000E–79.000 E (с 9 выделенными элементарными ячейками). Сопоставление вариаций коэффициента Лоде-Надаи (кривые а), среднегодовых чисел солнечных пятен (кривая б) и интенсивности нейтронной компоненты космических лучей (кривая в) по данным высокогорной станции Тянь-Шань. 1980–2005 гг.

Результаты анализа полученных данных показал, что на территории высокогорной станции Тянь-Шань, коэффициент Лоде-Надаи, рассчитанный по механизмам очагов слабых толчков и землетрясений средней силы показывает достаточно четкие 11-тилетние вариации в противофазе с числом солнечных пятен и в фазе с интенсивностью потока космических лучей. Такие вариации коэффициента μ дают косвенные указания на то, что в периоды повышенной солнечной активности в выделенной пространственной области доминируют растягивающие напряжения, а в периоды пониженной солнечной активности влияние растягивающих напряжений уменьшается, и режим сеймотектонических деформаций переходит от растяжению к сдвигу и сжатию.

Возникает вопрос, какие особенности присущи земной коре и мантии на территории данного района по сравнению с соседними районами Тянь-Шаня? В [10] показано, что горные сооружения (орогены) Тянь-Шаня относятся к коллизионному типу и отличительной чертой их структуры является взбросовое коробление коровых блоков субширотных хребтов, а их северо-западные ответвления обусловлены поднятием блоков по трансрегиональным взбросовым сдвигам. Поведение орогенных зон Тянь-Шаня соответствует модели двухслойной мантийной конвекции в комбинации с двухэтажными мантийными плюмами (восходящими потоками горячих полей), которые генерируются на границе ядро–мантия и в дальнейшем трансформируются на границе верхняя

мантия – нижняя мантия, распространяясь вверх до подкорового пространства.

В [11] для выявления пространственного положения плюмов на гипсометрических уровнях от 500 км до подошвы коры, проведено скоростное моделирование литосферы (в абсолютных значениях скоростей продольных волн V_p) по субширотным и субмеридиональным геотраверсам, расположенным вблизи высокогорной станции Тянь-Шань (рисунок 4).

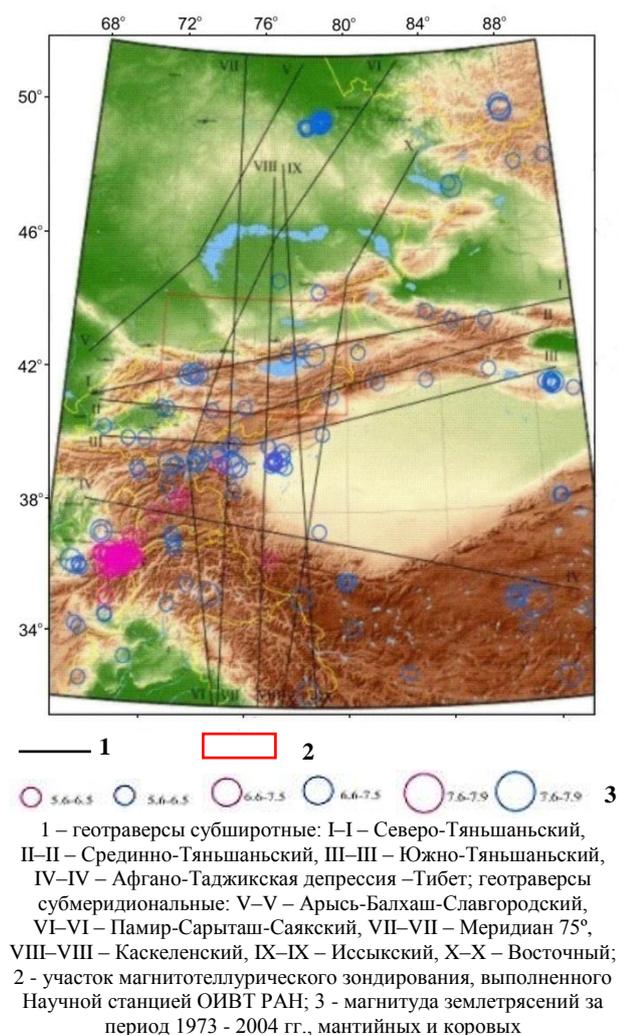


Рисунок 4. Система геотраверсов, использованных для P -скоростного моделирования литосферы Центральной Азии [11]

Рассматриваемый район, для которого рассчитаны характеристики сейсмостектонических деформаций по механизмам очагов землетрясений, примыкает к субширотному геотраверсу I–I (Северо-Тяньшаньский), а также к субмеридиональным геотраверсам VIII–VIII (Каскеленский) и IX–IX (Иссыкский). Поэтому ниже приведены результаты мо-

делирования, полученные ранее для этих геотраверсов [11]. На рисунке 5 приведена двумерная P -скоростная модель земной коры и верхней мантии по геотраверсу I–I (Северо-Тяньшаньский) с координатами: 41.25N, 69.167E; 44.083N, 90.00E. Коровая часть модели включает мезозойско-кайнозойский осадочный чехол и эродированную часть кровли палеозойского фундамента со значениями $V_p \leq 5,6$ км/с и $\rho < 2,6$ г/см³. Далее следует консолидированная земная кора, в пределах которой формируется подавляющее большинство очагов сильных землетрясений на Тянь-Шане. Она подразделяется на верхний сиалический (гранито-гнейсовый) и нижний базифицированный комплексы. Сиалический комплекс состоит из двух подслоев – верхнего, представленного палеозойскими вулканогенно-осадочными образованиями, и нижнего, сложенного метаморфическими породами докембрия. Верхний подслон характеризуется значениями $V_p = 5,6–6,0$ км/с и $\rho = 2,65$ г/см³, нижний – $V_p = 6,0–6,4$ км/с и $\rho = 2,75$ г/см³. Базифицированный комплекс так же представлен двумя подслоями – верхним гранулитогнейсовым со значениями $V_p = 6,4–6,8$ км/с, $\rho = 2,85$ г/см³ и нижним гранулит-базитовым со значениями $V_p = 6,8–7,2$ км/с, $\rho = 2,95$ г/см³. Ниже консолидированной коры до подошвы (граница М) фрагментарно выделена коромантийная смесь со значениями $V_p > 7,2$ км/с, $\rho = 3,05$ г/см³. Консолидированная земная кора орогенов, которые в регионе практически все высокосейсмичны, характеризуется аномально повышенной мощностью верхнего сиалического комплекса пород и, соответственно, пониженной мощностью нижнего базифицированного комплекса. Скоростные модели верхней мантии от границы Мохоровичича до глубины 500 км показаны в изолиниях абсолютных значений V_p с сечением 0,2 км/с. Представляющие интерес зоны со значениями продольных волн V_p , аномально пониженными относительно нормальной мантии (горячие поля – плюмы) на рисунке 5 выделены густой красной штриховкой. Видно, что между долготами 74°E и 78°E, куда входит изучаемая зона, под границей Мохоровичича является наиболее мощной. Зона простирается вглубь до примерно 100 км и подходит сюда с востока с глубины более 300 км. Таким образом, результаты скоростного моделирования литосферы по субширотному геотраверсу I–I (Северо-Тяньшаньский) показали, что на территории Северного Тянь-Шаня горячий мантийный поток (плюм) подходит снизу как раз в том интервале долгот, где обнаруживается наиболее сильная корреляция коэффициента Лодде-Надаи с вариациями космической погоды (рисунок 3).

ВАРИАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И СЕЙМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ
НА СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ: ЧАСТЬ 1. КОЭФФИЦИЕНТ ЛОДЕ-НАДАИ

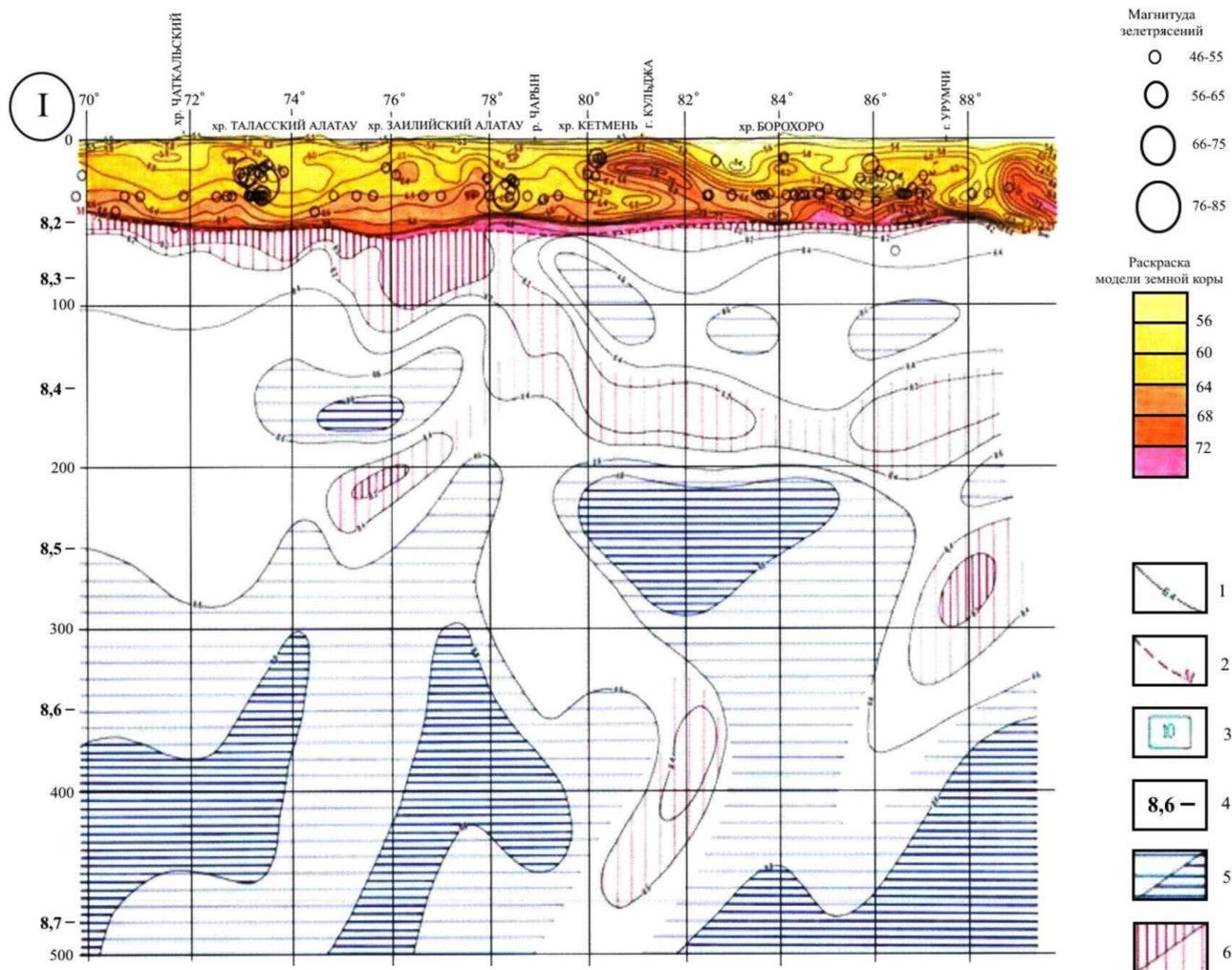


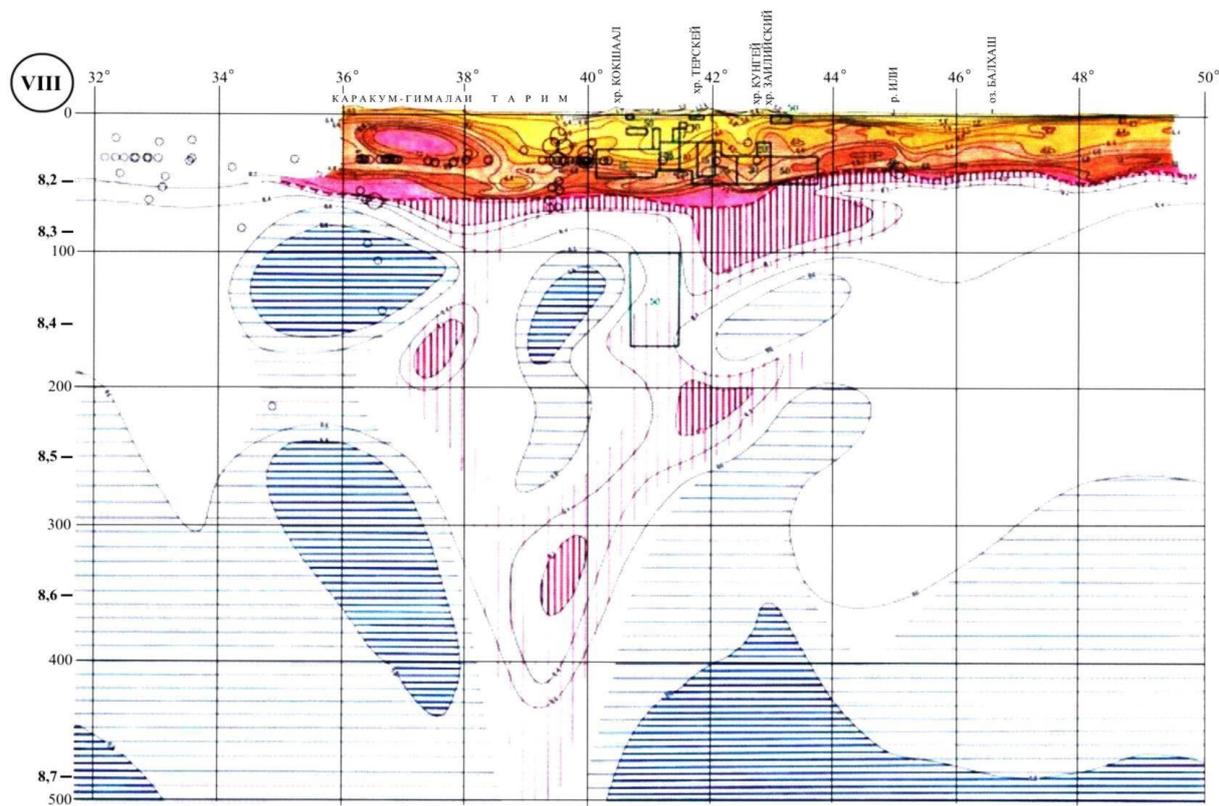
Рисунок 5. Двумерная P-скоростная модель земной коры и верхней мантии по геотраверсу I-I (Северо-Тяньшаньский) [11]

Выявленная закономерность будет еще более убедительной, если дополнительно проанализировать рисунок 6, где приведены результаты построения двумерной P-скоростной модели земной коры и верхней мантии по геотраверсу VIII-VIII (Каскеленский) с координатами 32.00N, 76.50E; 48.267N, 76.667E.

Из рисунка 6 видно, что между широтами 42°E и 44°E, где расположен исследуемый район, зона с густой красной штриховкой также наиболее глубоко проникает в мантию (до глубины более 100 км).

В [11] сейсмическая информация дополнена результатами магнитотеллурических зондирований (МТЗ) на Тянь-Шане и показано, что низкоомные (высокопроводящие) слои или объемы генерализованно совпадают с зонами пониженных значений сейсмической скорости.

Таким образом, пространственное расположение района, где наиболее сильно выражена связь коэффициента Лоде-Надаи с вариациями космической погоды, имеет ту отличительную особенность, что здесь земная кора подстигается большим объемом активной мантии (горячим мантийным плюмом). Этот результат позволяет предположить, что вариации космической погоды оказывают влияние на активность плюмовых каналов. Механизм влияния может реализовываться, например, через вариации температуры, поскольку сейчас установлены 11-тилетние вариации полной солнечной радиации в размере 0.01% [12] и выявлен отклик на эти вариации температуры поверхности мирового океана [13].



Условные обозначения на рисунке 5

Рисунок 6. Двумерная Р-скоростная модель земной коры и верхней мантии по геотранверсу VIII – VIII (Каскеленский) [11]

С учетом этого приведенные выше результаты могут быть интерпретированы следующим образом: на территории Северного Тянь-Шаня, на фоне регионального сжатия, обусловленного коллизией Евразийской и Индостанской литосферных плит, вследствие локального увеличения температуры мантии (одной из причин которого может быть увеличение солнечной радиации) происходит относительное уменьшение сил сжатия из-за разуплотнения мантии (повышения текучести). В результате, в этих условиях, на тех локальных территориях, где

имеются подстилающие мантийные плюмы, возможно относительное растяжение (уменьшение сжатия), реконструируемое многочисленными очагами землетрясений со сбросовыми механизмами в очагах в отличие от большинства взбросовых механизмов в окружающем пространстве. Кроме этого, можно предположить, что механизм влияния будет реализовываться через земные (теллурические) токи, поскольку, как показано в [11], зоны расположения плюмов, поднимающихся из нижней мантии, совпадают со слоями высокой электропроводности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ризниченко, Ю.В. Проблемы сейсмологии: избранные труды / Ю.В. Ризниченко. – М.: Наука, 1985. – 406 с.
2. Сыдыков, А. Сеймотектоническое деформирование среды по данным о механизмах очагов землетрясений / А. Сыдыков, А.Б. Садыкова, Н.Н. Полешко // Вестник КазНТУ. – 2007. – № 2. – С. 12 – 17.
3. Нусипов, Е. Сейсмический режим и оценка сейсмической опасности территории Казахстана / Е. Нусипов., А. Сыдыков, А. Б. Садыкова, А. Ж. Жунусова, Н. Н. Полешко // Шестой Китайско-Казахстанский международный симпозиум по Тянь-Шаньским землетрясениям. Урумчи. – 2006. – С. 225 – 226.
4. Сыдыков, А Особенности сейсмичности и сейсмического режима территории Казахстана / А. Сыдыков, А.Б. Садыкова // Геология и охрана недр. – 2007. – № 2. – С. 58 – 61.
5. Землетрясения в СССР в 1962 - 1991 гг. – М.: Наука. – 1964...1996.
6. Землетрясения Северной Евразии в 1992 - 2000 гг. – М.: РАН. – 1997...2004.
7. Землетрясения Средней Азии и Казахстана в 1979-1985 гг. – Душанбе: Дониш. – 1980...1988.
8. Мостриков, А.О. Каталог фокальных механизмов / А. О. Мостриков, В. А. Петров. – М. - 1994.
9. Лукк, А.А. Вопросы точности определения механизмов очагов коровых землетрясений и сеймотектонические деформации Средней Азии и Казахстана / А. А. Лукк [и др.] // Землетрясения Средней Азии и Казахстана в 1980 году. – Душанбе: Дониш. – 1982. – С. 66 – 95.
10. Соболева, О.В. Расчет параметров сеймотектонической деформации / О. В. Соболева, Д. Г. Бибарсова, З. Н. Вахидова / Деп. ВИНТИ. – № 5402 - 81. – 1981.

11. Нусипов, Е. Глубинное строение орогенов Гиндукуша, Памира, Тянь-Шаня и Казахского щита / Е. Нусипов, А. Б. Оспанов, В.И. Шацлов, А.В. Тимуш // Сейсмические исследования земной коры. –Новосибирск.– 2004. – С. 223 – 231.
12. Construction of a Composite Total Solar Irradiance (TSI) Time Series from 1978 to present. Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos (PMOD). Retrieved on October 5. – 2005.
13. White, W.B. A response of global upper ocean temperature to changing solar irradiance / W.B. White [et al] // J. Geophys. Res. – 1997. – 102. – P 3255 – 3266.

СОЛТҮСТІК ТЯНЬ-ШАНЬДАҒЫ КҮННІҢ АКТИВТІЛІГІ ЖӘНЕ СЕЙСМОТЕХТОНИКАЛЫҚ ДЕФОРМАЦИЯЛАРДЫҢ ВАРИАЦИЯЛАРЫ: 1 БӨЛІГІ. ЛОДЕ-НАДАИ КОЭФФИЦИЕНТІ

¹⁾Полешко Н.Н., ²⁾Садықова А.Б., ²⁾Сыдықов А., ²⁾Тимуш А.В. ²⁾Хачикян Г.Я., ²⁾Шацлов В.И.

¹⁾ҚР БҒМ Сейсмологиялық тәжірибелі-әдістемелік экспедициясы» мемлекеттік мекеме, Алматы Қазақстан
²⁾ҚР БҒМ сейсмология институты, Алматы, Қазақстан

Солтүстік-Тянь-Шань аймағы күннің активтілігі және/немесе ғарыштық сәулелер ағынының қарқындылығы мен жер қыртысының сейсмотехтоникалық деформацияланған түрінің вариацияларымен өзара байланысы талданған. Күннің активтілігінің 11-жылдық циклінде сейсмотехтоникалық деформациялардың вариациялары табылған. Активті мантияның терең құрылысы мен температурасының ерекшеліктерімен табылған заңдылықтарының байланысы белгіленген.

VARIATIONS OF SOLAR ACTIVITY AND SEISMO-TECTONIC DEFORMATIONS OF NORTH TJAN-SHAN: 1. LODE-NADAI COEFFICIENT

¹⁾N.N. Poleshko, ²⁾A.B. Sadikova, ²⁾A. Sidikov, ²⁾A.V. Timush, ²⁾G.Ya Khachikjan, ²⁾V. I. Shatsilov

¹⁾Seismological Experimental-Methodical Expedition, MES RK, Almaty, Kazakhstan
²⁾Institute of Seismolog, MES RK, Almaty, Kazakhstan

Interdependence between variations of solar activity and/or intensity of cosmic rays and a type of seismo-tectonic deformation of litho-sphere at North Tien-Shan has been investigated. It has been shown that the strength of the deformations of compression varies in 11-year solar cycle. There was also dependency established of identified regularities on morphology peculiarities and temperature of active mantle.

УДК 550.34

**ВАРИАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И
СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ НА СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ:
ЧАСТЬ 2. АЗИМУТ ОСИ НАПРЯЖЕНИЯ СЖАТИЯ**

¹Полешко Н.Н., ²Садыкова А.Б., ²Сыдыков А., ²Тимуш А.В., ²Хачикян Г.Я., ²Шацкилов В.И.

¹*Сейсмологическая опытно-методическая экспедиция МОН РК, Алматы, Казахстан*

²*Институт сейсмологии МОН РК, Алматы, Казахстан*

Показано, что на локальной территории Северного Тянь-Шаня, где земная кора подстилается мощным слоем активной мантии (горячим мантийным плюмом) азимут оси напряжения сжатия изменяется в связи с изменением солнечной активности в 11-летнем цикле: в годы низкой солнечной активности ось преимущественно направлена на север, в годы высокой солнечной активности – на юг.

ВВЕДЕНИЕ

На Северном Тянь-Шане поле сейсмоструктурной деформации (СТД) изменяется в пространстве и во времени [1]. Количественными характеристиками СТД являются: коэффициент интенсивности СТД (χ), коэффициент Лоде-Надаи (μ), азимуты (AzP) и углы погружения осей напряжений сжатия и растяжения. Ранее в [2,3] нами было показано, что на локальной территории Северного Тянь-Шаня коэффициент Лоде-Надаи, характеризующий вид сейсмоструктурной деформации и изменяющийся в диапазоне значений от $\mu = +1$ (режим одноосного сжатия) до $\mu = -1$ (режим одноосного растяжения), варьирует в зависимости от 11-летних вариаций солнечной активности. На территории, где земная кора подстилается мощным слоем активной мантии (горячим мантийным плюмом), значения μ в основном положительные в годы низкой солнечной активности (преобладает тектонический режим одноосного горизонтального сжатия) и отрицательные в годы высокой солнечной активности (режим одноосного вертикального растяжения). Было высказано предположение, что 11-летние вариации солнечной активности влияют на активность мантийных плюмовых каналов. Это затем сказывается на характере разрывов и смещений геологической среды в очагах землетрясений и, следовательно, на реконструируемом поле СТД. В данной работе изучены пространственно-временные вариации другого параметра СТД – азимута оси напряжения сжатия (AzP).

В настоящее время регион Северного Тянь-Шаня в целом характеризуется устойчивым направлением оси сжатия, близким к меридиональному [1], что согласуется с хорошо выраженным преобладанием близширотного простирания основных геологических структур Северного Тянь-Шаня. В подавляющем большинстве случаев угол погружения оси сжатия составляет с вертикалью $80^\circ - 90^\circ$ [1], что свидетельствует о близгоризонтальном сжатии, характерном для всего региона Средней Азии. Учитывая, что для анализируемой территории имеется представительная информация о механизмах очагов землетрясений за последние 26 лет (1982 - 2007 гг.), проведе-

но исследование пространственно-временных вариаций азимута оси напряжения сжатия для выявления возможной их связи с 11-летними вариациями космической погоды (по числу солнечных пятен).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для расчета азимута оси напряжения сжатия AzP использован каталог механизмов очагов землетрясений (МОЗ) [2, 3], зарегистрированных на территории Казахстана и в сопредельных районах за период с 1982 г. по 2007 г. Анализировались землетрясения с энергетическими классами $K = 6 - 9$, которые составляют 92% каталога из более чем 8000 событий. Использована компьютерная технология построения МОЗ [4], где силовой моделью очага служит плоский дипольный тензор-девиатор, а исходной информацией являются знаки первых вступлений продольных P и поперечных S сейсмических волн. В процессе определения МОЗ использованы новые P - и S -скоростные модели земной коры высокосейсмичных орогенов Тянь-Шаня и прилегающих слабосейсмичных платформ, созданные в Институте сейсмологии. Расчеты проведены в пределах территории, ограниченной координатами: $42.5 - 44^\circ N$, $75 - 79^\circ E$ (рисунок 1), для элементарных территориальных ячеек размером $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ с шагом $0,25^\circ$. Временное осреднение проведено в интервале 36 месяцев с шагом 12 месяцев.

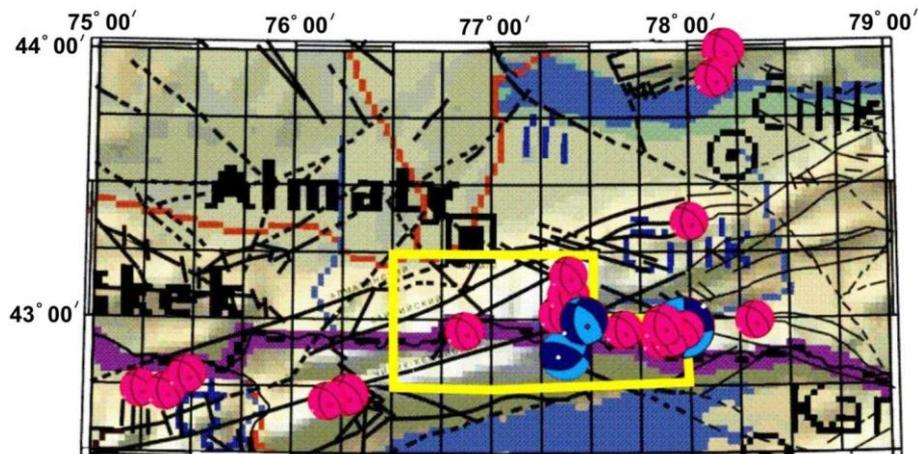
Число событий, отобранных для разных элементарных ячеек, как следует из таблицы, изменялось от 10 до 600. Для анализа связи AzP с вариациями солнечной активности на временном интервале 26 лет выбраны те ячейки, в пределах которых произошло более 150 событий (внутри таблицы эти ячейки выделены жирной черной рамкой). Предварительно выполнен анализ коэффициента интенсивности СТД (χ), по которому принято оценивать качество используемых данных [5]: значения $\chi < 0,2$ означают невысокую надежность получаемых решений. Для использованных данных оцененные значения χ были выше 0,2, что позволяет считать полученные результаты статистически достоверными.

**ВАРИАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И СЕЙМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ
НА СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ: ЧАСТЬ 2. АЗИМУТ ОСИ НАПРЯЖЕНИЯ СЖАТИЯ**

Таблица. Элементарные ячейки с числом землетрясений классов $K=6-9$, для которых проведен расчет азимута оси напряжения сжатия

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
5	17	15	10	12	10	27	45	31	22	33	61	59	43	40	23	10
4	24	17	10	10	18	40	42	23	31	60	126	170	143	155	117	26
3	32	36	25	15	23	65	211	255	175	183	197	345	553	481	208	42
2	37	47	35	51	82	141	399	539	452	407	504	608	697	533	200	45
1	71	54	70	136	149	138	212	318	305	273	424	499	351	279	220	87

* Голубым цветом выделены ячейки, для которых наблюдается корреляционная связь вариаций коэффициента Лодэ-Надаи с 11-тилетними вариациями солнечной активности [2, 3]



Желтая линия – контур региона, для которого выявлен отклик параметров сеймотектонической деформации на 11-тилетние вариации солнечной активности

Рисунок 1. Территория, ограниченная координатами 42.5 – 44.0°N, 75.0 - 79.0°E, для которой рассчитаны параметры сеймотектонической деформации по механизмам очагов землетрясений с $K=6-9$ за 1982 - 2007 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рисунке 2а цветными символами показаны среднегодовые значения азимута оси напряжения сжатия AzP для каждой элементарной ячейки (таблица) и каждого года за период 1982 - 2007 гг.

Из рисунка 2а видно, что значения AzP концентрируются в основном вокруг значений 0°, 360° (ось сжатия ориентирована на север) и вокруг значения

180° (ось сжатия ориентирована на юг). Гистограмма значений AzP (рисунок 2б) показывает, что нет предпочтения для одного из направлений, и число случаев, когда ось имеет северное направление и значения AzP сконцентрированы около 0°, 360° практически равно числу случаев, когда ось ориентирована на юг и значения AzP сконцентрированы вокруг 180°.

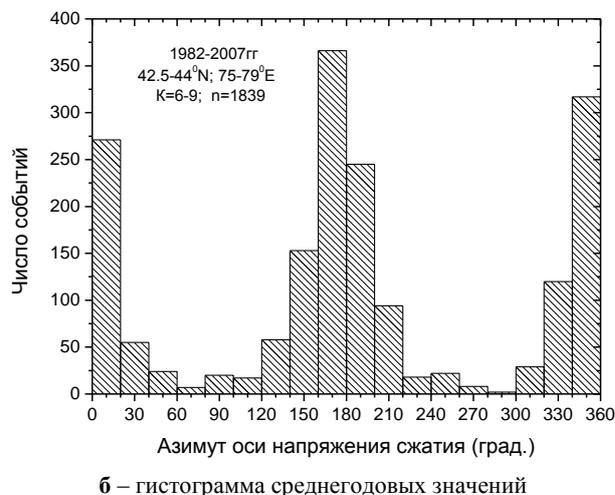
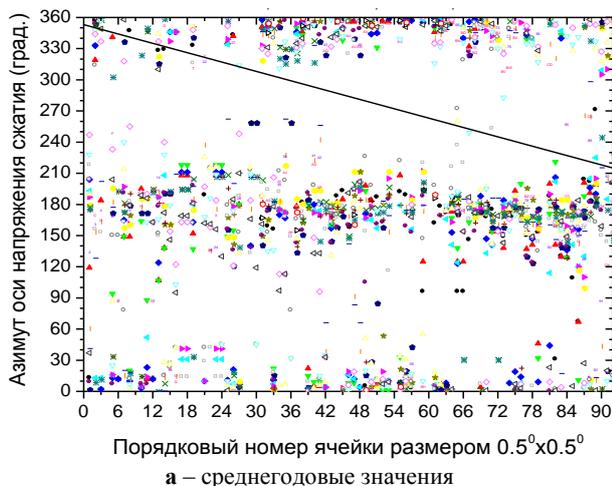
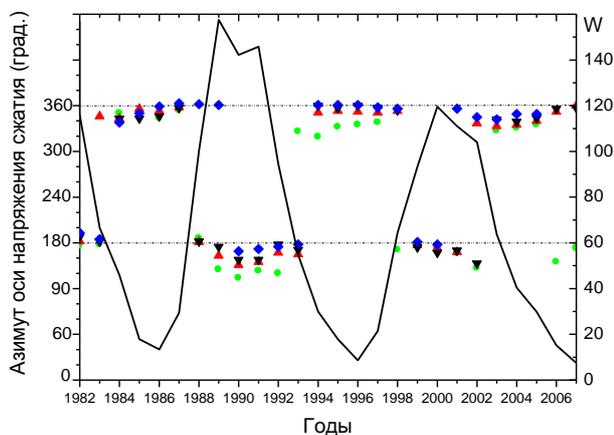


Рисунок 2. Территория, ограниченная координатами 42.5 – 44.0°N, 75.0 - 79.0°E. Азимут оси напряжения сжатия в территориальных ячейках за период с 1982 г. по 2007 г.

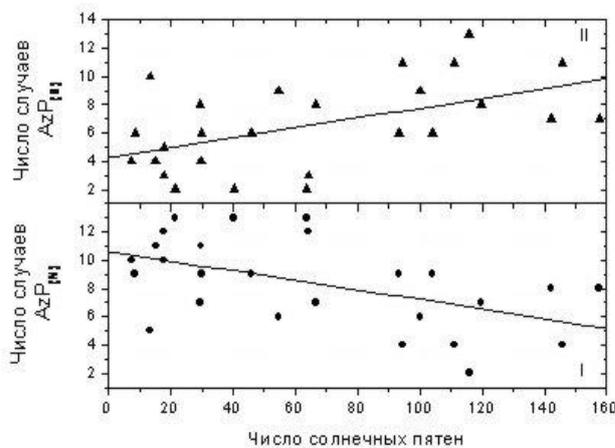
Детальный анализ временных вариаций AzP в каждой из элементарных ячеек, выделенных в таблице жирной рамкой (более 150 событий в ячейке), показал, что в ограниченном числе ячеек на локальном участке, расположенном в центре территории, с координатами $42.5 - 43.25^{\circ}N$, $76.5 - 77.25^{\circ}E$ наблюдается четкая корреляция между изменением азимута оси напряжения сжатия и изменением числа солнечных пятен (рисунок 3а).

Из рисунка 3а видно, что в пределах ячеек, выбранных для анализа, в годы минимума солнечной активности значения AzP концентрируются по направлениям 0° , 360° (ось сжатия ориентирована на север), а в годы максимума солнечной активности значения AzP концентрируются вокруг 180° (ось сжатия ориентирована на юг). Для остальных ячеек такой четкой связи не обнаружено. В то же время, когда для каждого года отдельно была подсчитана сумма ячеек

с ориентацией оси сжатия на север ($AzP = \sim 0^{\circ}$, 360°) и сумма ячеек с ориентацией оси сжатия на юг (значениями $AzP = \sim 180^{\circ}$), а затем построены графики зависимости числа этих случаев от числа солнечных пятен W , то обнаружилось (рисунок 3б), что с ростом солнечной активности уменьшается число ячеек, в которых азимут оси напряжения сжатия направлен на север (3б, I), но увеличивается число ячеек, в которых азимут оси напряжения сжатия направлен на юг (3б, II). Этот вывод качественно согласуется с результатом, приведенным на рисунке 3. На рисунке 4 приведены среднегодовые числа солнечных пятен за период с 1982 г. по 2008 г. (сплошная кривая) и число случаев в каждом году с южной ориентацией оси напряжения сжатия на территории $42.5 - 43.25^{\circ}N$, $76.5 - 78.75^{\circ}E$. Вертикальными стрелками на рисунке указаны годы, когда на этой территории произошли сильные землетрясения с $K > 12$.

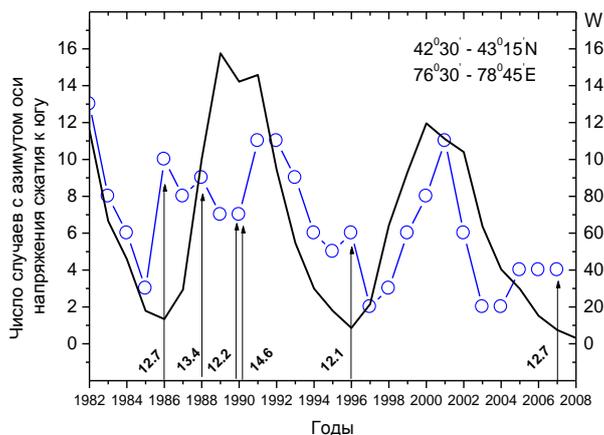


Кривая – число солнечных пятен W ;
символы - среднегодовое значение азимута оси
напряжения сжатия в различных элементарных ячейках
а – среднегодовых значений азимута
оси напряжения сжатия в элементарных ячейках



Линия – аппроксимация полиномом первой степени;
символы: I – ось напряжения сжатия направлена на север;
II – ось напряжения сжатия направлена на юг
б – числа случаев южной
и северной ориентировки оси сжатия

Рисунок 3. Территория, ограниченная координатами $42.5 - 43.25^{\circ}N$, $76.5 - 78.75^{\circ}E$. Сопоставление с солнечной активностью



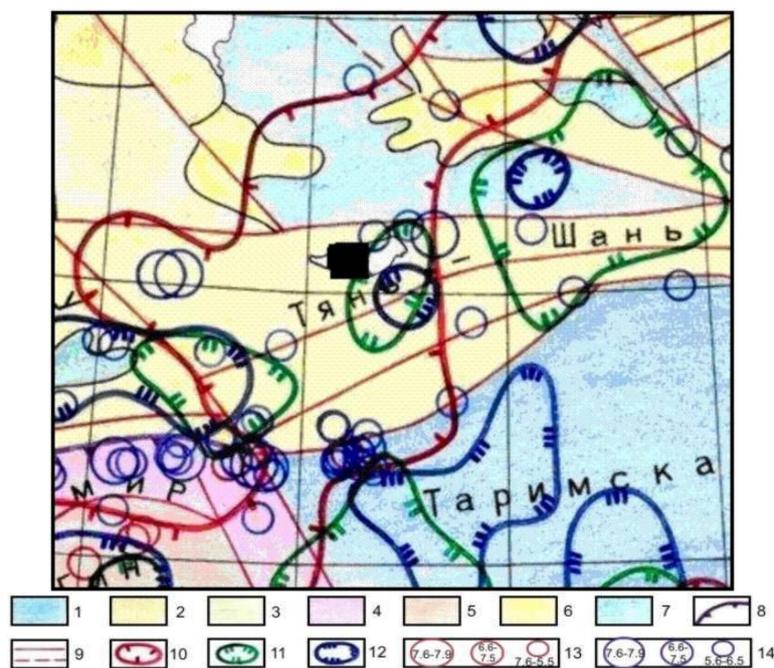
Линии - вариации: черная - вариации числа солнечных пятен; синяя - вариации числа случаев с южной ориентацией азимута оси напряжения сжатия. Цифра у стрелки – дата землетрясения с $K > 12.0$

Рисунок 4. Территория, ограниченная координатами $42.5 - 43.25^{\circ}N$, $76.5 - 78.75^{\circ}E$. Сопоставление вариаций числа солнечных пятен с числом случаев южной ориентации оси напряжения сжатия и с датами землетрясений с $K > 12.0$

Если сопоставить две кривые на рисунке 4, то можно видеть, что в течение 1982–1985 гг. их ход подобен. В 1986 г., когда на данной территории произошло землетрясение с $K=12.7$, наблюдается сбой в синхронности хода этих кривых. Можно предположить, что причиной нарушения синхронности был именно процесс подготовки ощутимого землетрясения. Аналогичная ситуация имела место в период с 1988 г. по 1990 г., когда произошло три землетрясения с $K=13.4, 12.2$ и 14.6 , а также в период с 2005 г. по 2007 г., когда происходила подготовка и реализация землетрясения с $K=12.7$. В то же время, в период с 1997 г. по 2005 г. землетрясений с $K \geq 12.0$ на исследуемой территории не происходило, и ход двух кривых в эти годы вновь был синхронным. Таким образом, результаты сопоставления, приведенные на рисунке 4, поддерживают предположение о том, что причиной нарушения синхронности между 11-тилетними вариациями числа солнечных пятен и азимута оси напряжения сжатия на конкретной территории может быть процесс подготовки на данной территории сильных землетрясений.

На основании проведенных сопоставлений (рисунки 3–4) можно высказать предположение, что 11-тилетние вариации характеристик космической погоды порождают 11-тилетние вариации в напряженно-деформированном состоянии земной коры. Одна-

ко эффективность отклика земной коры на вариации космической погоды изменяется во времени и пространстве. Что касается изменений во времени, то можно предположить (рисунк 3а), что подготовка сильных землетрясений маскирует связь режима сеймотектонического деформирования с вариациями космической погоды. Что же касается изменения в пространстве, то для исследованного нами ранее параметра СТД (коэффициент Лоде-Надаи) обнаружено [2, 3], что этот параметр откликается на вариации космической погоды лишь в тех районах, где земная кора подстилается мощным слоем активной мантии (горячим мантийным плюмом). Аналогичная ситуация имеет место и для азимута оси напряжения сжатия. Четкая связь этого параметра с 11-тилетними вариациями космической погоды выявлена только на локальной территории с координатами $42.5\text{--}43.25^\circ\text{N}$, $76.5\text{--}77^\circ\text{E}$ (рисунк 3а). На карте структуры активной мантии, построенной для Центрально-Азиатского региона (рисунк 5) [6], где указаны контуры плюмовых каналов по срезам на глубинах 70 км (красный), 170 км (зеленый) и 470 км (фиолетовый), видно, что эта локальная территория тяготеет к центральной части мантийного плюмового канала (черный квадрат), точнее – приурочена к границе контура плюмового канала по срезу на глубине 170 км.



1 – древние платформы; 2 – палеозойский фундамент молодой платформы (щит); 3 – мезозойско-кайнозойский чехол молодой платформы; 4 – 5 – складчатые комплексы коллизионных (эпигеосинклинальных) орогенов - мезозойских (4) и кайнозойских (5); 6 – эпиплатформенные (телеколлизионные) орогены; 7 - мезозойско-кайнозойский чехол предгорных и межгорных впадин; 8 – границы коллизионной области (эпигеосинклинальных орогенов); 9 – главные разломы, достоверные и предполагаемые; 10 – 12 – контуры распространения активной мантии на глубинах 70 км (10), 170 км (11) и 470 км (12); 13 – 14 – эпицентры и магнитуда землетрясений за 1973 – 2004 гг.: мантийных (13) и коровых (14)

Рисунок 5. Фрагмент неотектонического районирования и структура активной мантии в Центрально-Азиатском регионе по [7]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По механизмам очагов слабых и умеренных землетрясений (энергетического класса $K = 6 - 9$), зарегистрированных на территории Северного Тянь-Шаня в 1982 – 2007 гг., рассчитаны среднегодовые значения азимута оси напряжения сжатия (AzP) в элементарных территориальных ячейках, с горизонтальными размерами 0.5° по широте и долготе, и изучены вариации AzP в пространстве и во времени. Установлено, что на территории, где земная кора

подстигается мощным слоем активной мантии (горячим мантийным плюмом) азимут оси напряжения сжатия изменяется в соответствии с изменением солнечной активности в 11-тилетнем цикле: в годы низкой солнечной активности преобладает тенденция направления AzP на север, а в годы высокой – на юг. Полученные результаты подтверждают уже высказанное ранее [2, 3] предположение, что 11-тилетние вариации солнечной активности влияют на активность мантийных плюмовых каналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сыдыков, А. Сеймотектоническое деформирование среды по данным о механизмах очагов землетрясений / А. Сыдыков, А.Б. Садыкова, Н.Н. Полешко // Вестник КазНТУ. – 2007. – № 2. – С. 12 – 17.
2. Полешко, Н.Н. Напряженно-деформированное состояние земной коры на северном Тянь-Шане по механизмам очагов землетрясений: связь с глубинной геодинамикой и 11-летними вариациями солнечной активности / Н. Н. Полешко, А. Б. Садыкова, А. Сыдыков, А. В. Тимуш, Г. Я. Хачикян, В. И. Шапилов // Материалы Четвертого международного симпозиума «Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геозоологические проблемы». – Бишкек: ИВТ РАН – 2008. – С. 372 – 375.
3. Абаканов, Т. Солнечная активность, космические лучи, глубинная геодинамика и поле сеймотектонических деформаций на северном Тянь-Шане / Т. Абаканов, А. Н. Ли, Н. Н. Полешко, А. Б. Садыкова, А. Сыдыков, А. В. Тимуш, Г. Я. Хачикян, В. И. Шапилов // Журнал проблем эволюции открытых систем, 2007. – Вып. IX, Т. 1. – С. 78 – 87.
4. Соболева, О.В. Расчет параметров сеймотектонической деформации / О. В. Соболева, Д. Г. Бибарсова, З. Н. Вахидова // Деп. ВИНТИ – № 5402-81. – 1981.
5. Лукк, А.А. Вопросы точности определения механизмов очагов коровых землетрясений и сеймотектонические деформации Средней Азии и Казахстана / А. А. Лукк [и др.] // Землетрясения Средней Азии и Казахстана в 1980 году. – Душанбе: Дониш. – 1982. – С. 66 – 95.
6. Шапилов, В.И. Особенности строения литосферы Тянь-Шаня и прилегающих платформ / Геодинамические, сейсмологические и геофизические основы прогноза землетрясений и оценки сейсмического риска / В. И. Шапилов, А. В. Тимуш, Н. Степаненко, Т. Кайдаш, Н. Белоусова. – Алматы. – 2005 – С. 118 – 126.

СОЛТҮСТІК ТЯНЬ-ШАНЬДАҒЫ КҮННІҢ АКТИВТІЛІГІ ЖӘНЕ СЕЙМОТЕХТОНИКАЛЫҚ ДЕФОРМАЦИЯЛАРДЫҢ ВАРИАЦИЯЛАРЫ: 2 БӨЛГІ. ӨСТІҢ ҚЫСЫЛУ КЕРНЕУІНІҢ АЗИМУТЫ

¹⁾Полешко Н.Н., ²⁾Садыкова А.Б., ²⁾Сыдыков А., ²⁾Тимуш А.В., ²⁾Хачикян Г.Я., ²⁾Шапилов В.И.

¹⁾ҚР БҒМ Сейсмологиялық тәжірибелі-әдістемелік экспедициясы, Алматы, Қазақстан

²⁾ҚР БҒМ сейсмология институты, Алматы, Қазақстан

Солтүстік Тянь-Шанның локальды аймағында жер қыртысы (ыстық мантия плюмымен) активті мантияның қалыңдық қабатымен жайылған аумағында, өстің қысылу кернеуінің азимуты 11 жылдық цикліндегі күннің активтілігін өзгеруімен өзгертілетіні көрсетілген: күннің төменгі активтілігі жылдары өсі әсіресе солтүстікке, ал оңтүстікке – жоғары активтілігі жылдары бағытталады.

VARIATIONS OF SOLAR ACTIVITY AND SEISMO-TECTONIC DEFORMATIONS OF NORTH TJAN-SHAN: 2. AZIMUTH OF DEPRESSION AXIS

¹⁾N.N. Poleshko, ²⁾A.B. Sadikova, ²⁾A. Sidikov, ²⁾Timush A.V., ²⁾G.Ya Khachikjan, ²⁾V. I. Shatsilov

¹⁾Seismological Experimental-Methodical Expedition, MES RK, Almaty, Kazakhstan

²⁾Institute of Seismology MES RK, Almaty, Kazakhstan

It was witnessed that on a local territory of Northern Tien-Shan, where a heavy layer of active mantle (hot mantle plum) underlies the earth crust, the azimuth of compression strain axis changes with variation of solar activity in 11 year cycle: during the years of low solar activity the axis is north-prone and in the years of high activity it is directed to the south.

УДК 550.3.006:550.34

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭТАЛОННЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В СЕЙСМОМЕТРИИ

Янковский А.А.

*ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт
метрологии им. Д.И. Менделеева», Санкт-Петербург, Россия*

Обсуждаются основные направления развития эталонной сейсмометрической аппаратуры, предназначенной для воспроизведения, хранения и передачи размера единиц длины, скорости и ускорения, и основные результаты исследования прототипов эталонных установок, созданных во ВНИИ метрологии им. Д. И. Менделеева.

Существующий Государственный специальный эталон единиц длины, скорости и ускорения для сейсмометрии создавался, в основном, для решения задач метрологического обеспечения телесеизмических измерений в интересах Министерства обороны. За прошедшие годы круг сейсмометрических задач, для решения которых требуется знание метрологических характеристик применяемых сейсмопреобра-

зователей, существенно расширился. В таблице 1 приведен перечень таких задач – от геологоразведочных работ до контроля за ядерными испытаниями, - и показано требуемое изменение характеристик сейсмических преобразователей, в числе которых масса, динамический диапазон, точность измерений, от которых зависит успешность решения сейсмометрических задач.

Таблица 1. Основные характеристики сейсмопреобразователей

№ п/п	Сейсмометрические задачи	Масса сейсмометров, кг	Точность, %	Динамический диапазон, дБ
1	Геологоразведочные	0.1	5 - 30	100 - 120
2	Структурная сейсмология	1	3 - 10	60
3	Сейсмическое районирование	1 - 10	10 - 30	40 - 50
4	Экологический мониторинг и предотвращение техногенных катастроф	1 - 100	1 - 3	60
5	Предсказание землетрясений	1 - 100	0.5 - 10	80 - 100
6	Контроль ядерных испытаний	1 - 100	0.1 - 0.5	100 - 120
7	Научные проблемы сейсмологии: геодинамика, внутреннее строение Земли и др.	1 - 100	0.1 - 10	>120

На рисунке 1 дополнительно показаны частотные поддиапазоны сейсмических приемников, необходимых для решения задач (1 – 7), перечисленных в таблице 1.

Из таблицы 1 и рисунка 1 следует, что современная сейсмометрия охватывает значительный круг задач, широкий диапазон частот (10^{-3} - 10^2 Гц), динамический диапазон измерений (>120 дБ) и требует развития метрологического обеспечения. В сейсмо-разведке на современном этапе метрологическое обеспечение связано с такими величинами, как скорость, ускорение, длина. На рисунке 2 приведен общий вид ранее созданных государственных специальных эталонов единиц длины, скорости и ускорения для сейсмометрии – УСГ-1, УСГ-2, УСГ-Г, УСВ-1 (ГЭТ 159-97).

В таблице 2 даны характеристики этих Государственных специальных эталонов.

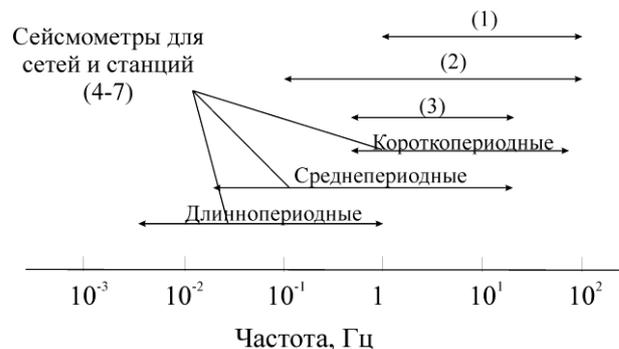


Рисунок 1. Частотные поддиапазоны сейсмических приемников



УСГ-1



УСГ-2



СГ-Г



УСВ-1

Рисунок 2. Государственный специальный эталон единиц длины, скорости и ускорения для сейсмометрии (ГЭТ 159-97)

Таблица 2. Характеристики Государственных специальных эталонов для сейсмометрии УСГ-1, УСГ-2, УСГ-Г, УСВ-1

№ п/п	Физическая величина	Диапазон амплитуд			Диапазон частот, Гц		
		УСГ-1, УСВ-1	УСГ-2	УСГ-Г	УСГ-1, УСВ-1	УСГ-2	УСГ-Г
1	Линейное ускорение	$10^{-7} = 1 \text{ м/с}^2$	$10^{-6} = 10^{-2} \text{ м/с}^2$	$5 \cdot 10^{-9} = 10^{-7} \text{ м/с}^2$	$10^2 = 20$	$10^{-3} = 0.1$	$10^{-3} = 0.3$
2	Линейное перемещение	$10^{-6} = 10^{-2} \text{ м}$	$10^{-7} = 10^{-3} \text{ рад}$				

На рисунке 3 приведена Государственная поверочная схема для средств измерения параметров сейсмических колебаний согласно (ГОСТ 8.562-97). Сопоставительный анализ характеристик и возможностей ранее созданных эталонных средств и требований к сейсмическим преобразователям, необходимым для решения современных задач сейсмометрии, позволил определить для новой эталонной аппаратуры следующие основные метрологические задачи:

1. Расширение амплитудного диапазона воспроизводимых параметров сейсмических колебаний до значений порядка $1g$.

2. Расширение частотного диапазона воспроизводимых параметров сейсмических колебаний в области как инфранизких ($<10 - 3 \text{ Гц}$), так и средних ($>100 \text{ Гц}$) частот.

3. Повышение линейности воспроизводимых параметров сейсмических колебаний (коэффициент гармоник $<0,01\%$)

4. Реализация методик аттестации косвенных методов определения метрологических характеристик неизвлекаемых сейсмопреобразователей.

5. Метрологическое обеспечение как фазовых, так и амплитудных измерений.

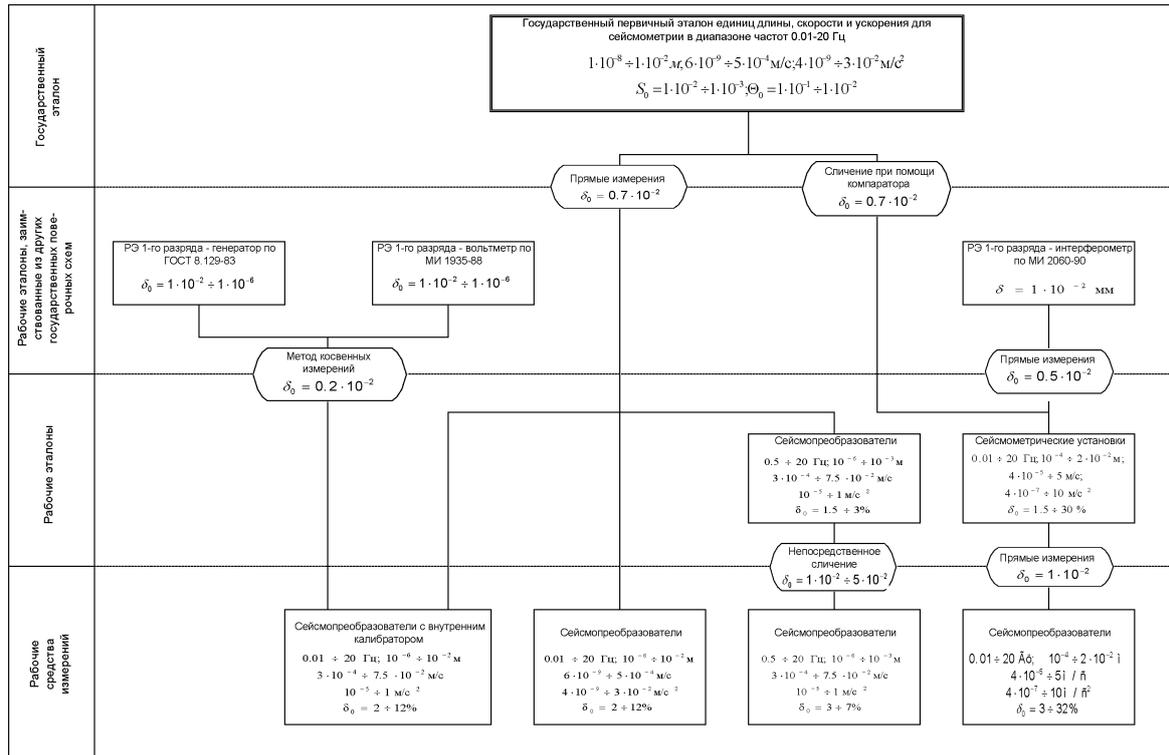


Рисунок 3. Государственная поверочная схема для средств измерения параметров сейсмических колебаний (ГОСТ 8.562-97)

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ ЭТАЛОННЫХ УСТАНОВОК

Определены следующие основные подходы для реализации эталонных установок нового класса:

1. Комбинирование в одной установке двух методов воспроизведения параметров вибрационных процессов: метода поворота в гравитационном поле Земли (воспроизведение параметров вибрационных процессов на частотах до 0,1 Гц) и метода линейного перемещения платформы (воспроизведение параметров вибрационных процессов на частотах выше 0,1 Гц).
2. Использование аэростатических направляющих, обеспечивающих высокую степень однонаправ-

ленности движения, высокую поперечную жесткость, низкий уровень шумового возбуждения и др.

3. Минимизация использования механических связей (пружин, редукторов и др.) подвижной платформы установки с основанием.

4. Использование компьютерной системы управления.

5. Использование бесконтактных (лазерно-интерферометрических, оптических, емкостных и т.д.) систем измерения.

Принципиальная схема эталонных установок приведена на рисунке 4.



Рисунок 4. Принципиальная схема эталонных установок

Ниже приведено описание прототипов двух эталонных установок, реализующих разработанные подходы, и созданных во ВНИИ Метрологии им. Д. И. Менделеева.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УСТАНОВКИ УСГ-3М

Установка УСГ-3М (рисунок 5, таблица 3) предназначена для воспроизведения параметров линейных и угловых вибрационных процессов: линейного перемещения, скорости и ускорения в горизонтальной плоскости, а также углового перемещения в вертикальной плоскости. Установка может быть использована для калибровки, метрологической аттестации, поверки и исследования различных высокочувствительных средств измерений: виброметров, сейсмометров, линейных и угловых акселерометров, наклономеров и др.

Отличительной особенностью установки является реализация двух методов воспроизведения параметров вибрационных процессов: метода поворота в гравитационном поле Земли (воспроизведение параметров вибрационных процессов на частотах до 0,1 Гц) и метода линейного перемещения платформы (воспроизведение параметров вибрационных процессов на частотах свыше 0,1 Гц).

С целью расширения частотного диапазона, в установке применена комбинация поворотной и линейно перемещающейся платформ, взвешенных на аэростатических опорах. Поворотная платформа снабжена двумя боковыми аэростатическими направляющими, обеспечивающими высокую степень однонаправленности ее перемещения. Управляющий измерительный комплекс установки на базе персонального компьютера может быть использован для регистрации выходных сигналов исследуемой на установке.



Рисунок 5. Электромеханическая система установки УСГ-3М – прототипа эталонной установки для воспроизведения параметров горизонтальных сейсмических колебаний

Таблица 3. Характеристики установки УСГ-3М

Параметр	Значение
Диапазон частот, Гц:	
воспроизведения линейных параметров вибрационных процессов	0,001 – 30
воспроизведения угловых параметров вибрационных процессов	0,001 – 0,5
Диапазон воспроизводимых амплитуд (при номинальной нагрузке):	
линейных перемещений, м	$10^{-6} - 10^{-2}$
линейных скоростей, м/с	$10^{-6} - 1$
линейных ускорений, м/с ²	$5 \times 10^{-7} - 5$
угловых перемещений, рад	$10^{-7} - 10^{-3}$
Воспроизведение линейных параметров вибрационных процессов в диапазоне частот:	
0,001 - 0,1 Гц, метод	поворота
0,1 - 30 Гц, метод	линейного перемещения
Основная воспроизводимая величина при воспроизведении линейных параметров вибрационных процессов в диапазоне частот:	
0,001 - 0,1 Гц	линейное ускорение
0,1 - 30 Гц	линейное перемещение
Погрешность воспроизведения амплитуды основной величины при воспроизведении линейных параметров вибрационных процессов (при номинальной нагрузке) в частотных поддиапазонах:	
0,001-0,1 Гц, м/с ²	$0,01Z+3 \times 10^{-8}$
0,1-30 Гц, м	$0,01Z+10^{-7}$
Погрешность воспроизведения амплитуды угловых параметров вибрационных процессов, рад	$0,01\varphi_0+3 \times 10^{-8}$
Уровень поперечных составляющих ускорений, %, не более	1 – 5
Грузоподъемность в частотных диапазонах:	
0,001 – 1 Гц	40 кг (макс. 60 кг)
1-30 Гц	5 кг (макс. 20 кг)
Габариты рабочей платформы, м	0,3х0,3
Электропитание	220В, 50 Гц, 1 кВт
Пневмопитание - сжатый воздух по ГОСТ 17433-80:	
класс загрязненности	1
давление, МПа	0,5
расход, м ³ /мин	1
Условия эксплуатации:	
температура окружающей среды, °С	20±3
атмосферное давление, МПа	0,1013±0,01
Примечание: Z – амплитуда воспроизводимой основной величины; φ_0 – амплитуда воспроизводимого углового перемещения	

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УСТАНОВКИ УСВ-2

Установка УСВ-2 (рисунок 6, таблица 4) предназначена для воспроизведения параметров линейных вибрационных процессов: линейного перемещения, скорости и ускорения в вертикальной плоскости. Установка может быть использована для калибровки, метрологической аттестации, поверки и исследования различных высокочувствительных средств измерений: виброметров, сейсмометров и линейных акселерометров. Примененная в конструкции установки специальной формы аэростатическая направляющая, обеспечивает высокую степень однонаправленности перемещения рабочей платформы и угловую стабильность платформы в процессе движения.

Подвеска подвижной платформы может быть выполнена в двух вариантах: пружинная, на основе стабилизированных пружин нулевой начальной длины с демпфированием; бесконтактная, на основе замкнутого электромагнитного подвеса с автоматической компенсацией веса полезной нагрузки.

Управляющий измерительный комплекс установки на базе персонального компьютера может быть использован для регистрации выходных сигналов исследуемой на установке аппаратуры.



Рисунок 6. Установка УСВ-2 - прототип эталонной установки для воспроизведения параметров вертикальных сейсмических колебаний

Таблица 3. Характеристики установки УСВ-2

Параметр	Значение
Диапазон воспроизводимых параметров вибрационных процессов:	
частота, Гц	0,001-50
амплитуда перемещения, м, при амплитуде ускорении не выше 5 м/с ²	10 ⁻⁶ – 10 ⁻²
амплитуда скорости, м/с, при амплитуде перемещений 10 ⁻⁶ – 10 ⁻³ м и амплитуде ускорений не выше 5 м/с ²	6,3·10 ⁻⁸ – 1
амплитуда ускорения, м/с ² при амплитуде перемещения 10 ⁻⁶ – 10 ⁻³ м	3,9·10 ⁻⁹ – 5
Основная воспроизводимая величина при воспроизведении линейных параметров вибрационных процессов	Линейное перемещение
Погрешность воспроизведения амплитуды линейного перемещения при воспроизведении линейных параметров вибрационных процессов	0,01X ₀ +10 ⁻⁷
Уровень поперечных составляющих ускорения, не более	1,5
Грузоподъемность	10 кг
Габариты рабочей платформы, м	0,3
Электропитание	220 В, 50 Гц, 1 кВт
Пневмопитание - сжатый воздух по ГОСТ 17433-80:	
класс загрязненности	1
давление, МПа	0,5
расход, м ³ /мин	1
Условия эксплуатации:	
температура окружающей среды, °С	20±3
атмосферное давление, МПа	0,1013±0,01
Примечание: X ₀ – амплитуда воспроизводимого линейного перемещения	

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК УСТАНОВКИ УСА-3М

Проведены исследования характеристик установки УСА-3М. На рисунке 7 приведены результаты исследования погрешности преобразователя перемещений – ее случайной и систематической составляющих. Систематическая составляющая погрешности измерительного преобразователя перемещений составила $\theta_{ИПП} = 5,2 \times 10^{-5}$ Л0. Коэффициент поперечных колебаний подвижной платформы установки (К) на частоте воспроизведения колебаний для режима 1 – $K_1=0,18\%$; для режима 2 – $K_2=0,63\%$. Коэффициент

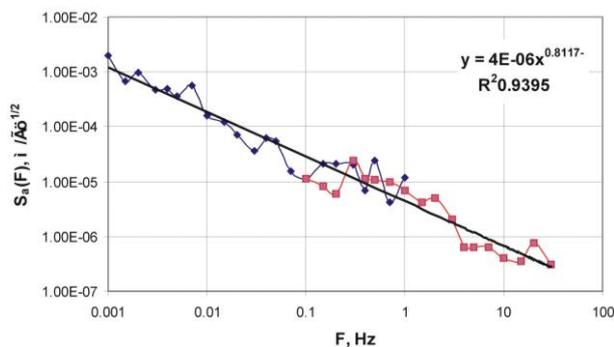


Рисунок 7. К результатам исследования погрешности измерительного преобразователя перемещений

возбужденных колебаний основания определен по результатам исследований, приведенных на рисунке 8.

Коэффициент наклонов подвижной платформы на частоте воспроизводимых колебаний $K\varphi_2=3,4 \times 10^{-7}$. Изучен амплитудный спектр собственных шумов электромеханической системы установки – рисунок 9

Как видно из рисунка 9, исследования проведены для двух частотных диапазонов: 0,001 - 5 Гц (дискретность по частоте 0,0005 Гц) и 0,1 - 100 Гц (дискретность по частоте 0,01 Гц).

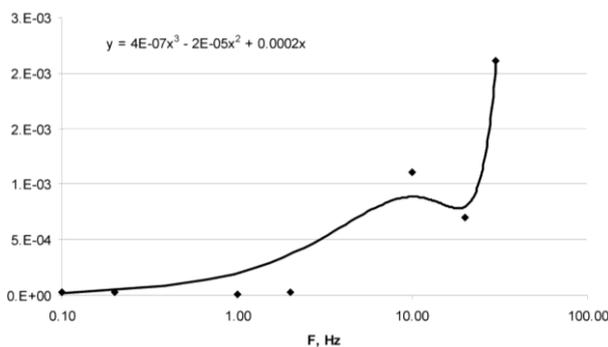
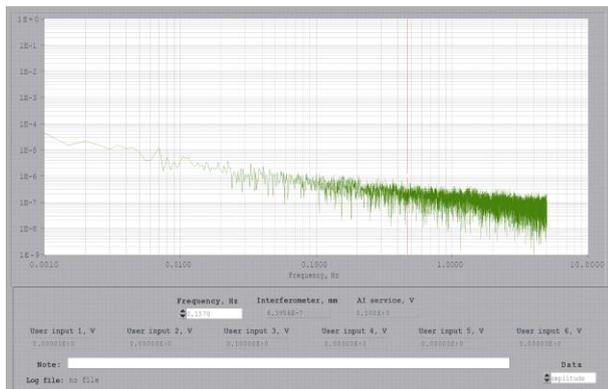
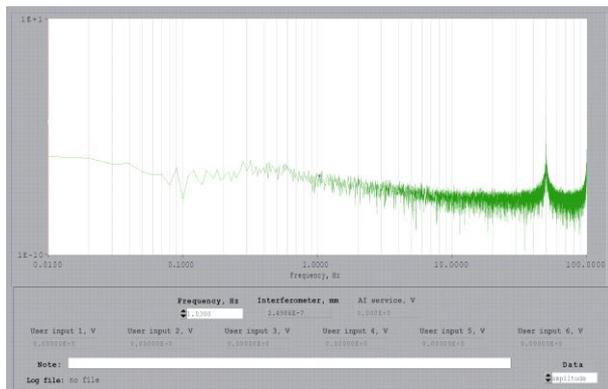


Рисунок 8. К результатам исследования коэффициента возбужденных колебаний основания



а – диапазон частот 0,001 - 5 Гц, дискретность по частоте 0,0005 Гц



б – диапазон частот 0,1 - 100 Гц, дискретность по частоте 0,01 Гц

Рисунок 9. Амплитудный спектр собственных шумов электромеханической системы установки УСА-3М

Адрес для контакта с разработчиками: Научно-производственное предприятие «Метрологические системы» ВНИИ метрологии им. Д.И. Менделеева. 191028, Россия, Санкт-Петербург, Кирочная, 6, оф. 4. Телефоны: +7 812 2733340, +7 812 2725044. Факс: +7 812 2722628. E-mail: msystems@mail.wptus.net

**СЕЙСМОМЕТРИЯДА МЕТРОЛОГИЯЛЫҚ ҚАМТАМАСЫЗ
ЕТУІ ҮШІН ҮЛГІ ҚҰРАЛДАРЫН ДАМЫТУ БАҒЫТТАРЫ**

Янковский А.А.

Д.И. Менделеев атындағы ФГУП «ВНИИМ», Санкт-Петербург, Ресей

Ұзындық, жылдамдық және үдеу бірліктердің мөлшерін жаңғырту, сақтау және жіберу үшін арналған үлгі сейсмометриялық аппаратурасын дамытуының негізгі бағыттары, және Д.И. Менделеев атындағы ВНИИ метрологияда жасалған үлі құрғылардың түп тұлғаларын зерттеуінің негізгі нәтижелері талқылануда.

**DIRECTIONS FOR DEVELOPMENT OF REFERENCE
INSTRUMENTS TO ENSURE METROLOGY IN SEISMOMETRY**

A.A. Yankovskiy

D.I. Mendeleev Institute for Metrology, Saint-Petersburg, Russia

Main directions for development of reference seismometry equipment designed to reproduce, store and transfer length, velocity and acceleration values and basic research results of reference prototype facilities, created in RSRMI named after Mendeleev, are discussed.

УДК 621.039.9

О РОЛИ АТОМНОГО ПРОЕКТА В РАЗВИТИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ НАУК

Васильев А.П.

Служба специального контроля Министерства обороны Российской Федерации, Москва

Атомный проект СССР, помимо создания отечественного ядерного оружия, вызвал к жизни новые отрасли народного хозяйства, дал мощный толчок развитию всех областей знаний и среди них - наукам о Земле. В статье делается попытка показать роль этого проекта в развитии геофизических наук на примере создания в Министерстве обороны системы дальнего обнаружения ядерных взрывов.

ПЕРИОД МОНОПОЛИИ США НА АТОМНОЕ ОРУЖИЕ

Впервые руководители Атомного проекта [1] обратились к геофизикам для попытки обнаружить эффекты дальнего действия взрывов американских атомных бомб, сброшенных на Хиросиму и Нагасаки в 1945 г. С этой целью были проанализированы записи барографов, работавших на дальневосточных метеостанциях. Сигналов от ядерных взрывов обнаружить не удалось [2]. В 1946 г. по решению Совета Министров СССР была организована комплексная научно-исследовательская экспедиция (рисунок 1) с целью организации в дальней зоне наблюдений за серией ядерных испытаний, проводимых США на Тихоокеанском полигоне (2 заряда мощностью по 21 кт каждый), куда были приглашены международные наблюдатели.

Во Владивостоке на расстоянии примерно 3000 км от Тихоокеанского полигона была проведена регистрация колебаний почвы обычными сейсмографами (Сейсмологический институт АН СССР) и

акустических волн - специально сконструированными высокочувствительными барографами (Институт химической физики АН СССР совместно с Сейсмологическим институтом и Институтом теоретической геофизики АН СССР; Главное управление гидрометеорологической службы при Совете Министров СССР). С помощью оптического прожекторного зондирования (Институт теоретической геофизики) было организовано слежение за физическим состоянием тропосферы и стратосферы. Наблюдение возможных радиоволновых эффектов было организовано Научно-техническим комитетом Военно-морского флота (ВМФ). Кроме того, на возвышенных местах вдоль тихоокеанского побережья от Владивостока до Порт-Артура работали армейские звукометрические станции. Гидроакустические волны измерялись специально приспособленными эхолотами, установленными на трёх кораблях (ВМФ при содействии и консультациях акустической лаборатории Физического института и Морского гидрофизического института АН СССР) [3].

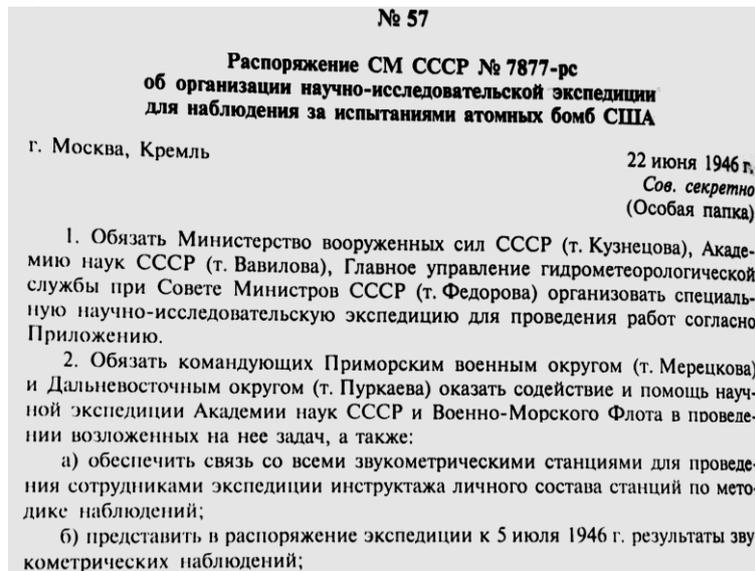


Рисунок 1. Фрагмент распоряжения Совета Министров СССР об организации специальной геофизической экспедиции для наблюдений за испытаниями атомных бомб США

В дополнение к этим измерениям, после первого атомного взрыва тихоокеанской серии академики Н.Н. Семёнов, И.В. Курчатов и А.И. Алиханов предложили провести опыт по улавливанию в воздухе радиоактивных частиц продуктов атомного взрыва с использованием самолётов и быстроходных кораблей. Однако из-за технических трудностей и риска работы на границе запретной зоны, объявленной США, предложение тогда не было реализовано [4]. В итоге, в 1946 г., несмотря на привлечение к работам видных учёных и солидных специализированных научных учреждений АН СССР, выявить на больших расстояниях какие-либо геофизические эффекты от атомных тихоокеанских взрывов не удалось. Основной причиной неудачи стало отсутствие представления о характере сигналов (амплитуде, спектре) от ядерных взрывов, недостаточность знаний о геофизических полях и, как следствие, применение технических средств регистрации, не соответствующих необходимым частотной полосе и чувствительности. В США результаты дальнего обнаружения держались в строгом секрете.

ПЕРИОД РАКЕТНО-ЯДЕРНОГО ПАРИТЕТА С США

Первый прогресс обнаружения дальних ядерных взрывов связан с первым советским испытанием атомной бомбы 29 августа 1949 г. Тогда на 6 сейсмических станциях СССР, расположенных на рас-

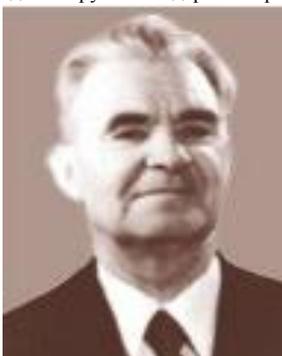
стояниях от 180 до 1600 км, были зарегистрированы сейсмические сигналы. Доклад об этом для Л.П. Берии был представлен научным сотрудником Геофизического института АН СССР (ГЕОФИАН) Ф.И. Монаховым (рисунок 2б) [5]. Режим секретности работ по Атомному проекту, из-за которого полученные данные были использованы лишь узким кругом лиц, не способствовал развитию достигнутого успеха. Так, 24 сентября 1951 г. на берегу оз. Боровое (примерно в 700 км от Семипалатинского полигона) полевым отрядом И.П. Пасечника (рисунок 2в) с участием Н.Е. Федосеенко (рисунок 2г) при испытаниях высокочастотного сейсмографа Гамбурцева был случайно зарегистрирован сейсмический сигнал от второго советского атомного взрыва. Сейсмограмма высокого качества впервые, как отмечает в своих воспоминаниях ветеран ГЕОФИАН Д.Д. Султанов, познакомила директора ГЕОФИАН академика Г.А. Гамбурцева (рисунок 2а) с характерными особенностями сейсмического сигнала, рождённого атомным взрывом. Однако эта уникальная запись была уничтожена по указанию режимных органов. Г.А. Гамбурцев на основе данной случайной регистрации и литературных источников в конце 1951 г. вышел с предложением в Первое главное управление при СМ СССР о создании системы обнаружения ядерных взрывов [6].



а – академик Г.А. Гамбурцев, инициатор и научный руководитель разработки сейсмического метода обнаружения ядерных взрывов



б – Ф.И. Монахов, первый интерпретатор записей сейсмических сигналов в дальней зоне ядерного взрыва 29.08.1949



в – И.П. Пасечник, бессменный (с 1955 по 1986 гг.) руководитель сейсмометрической лаборатории 5-С, сподвижник академика Г.А. Гамбурцева



г – Н.Е. Федосеенко, один из первых разработчиков сейсмометрической аппаратуры для регистрации ядерных взрывов, конструктор универсального сейсмографа Федосеенко (УСФ-3М)

Рисунок 2. Первые ученые-сейсмологи, занимавшиеся в СССР дальней регистрацией ядерных взрывов

Важные эксперименты по дальнему обнаружению были проведены во время первого термоядерного испытания на Семипалатинском полигоне 12 августа 1953 г. Группой военных связистов было обнаружено мощное электромагнитное излучение в радиочастотном диапазоне при экспериментальной регистрации радиоприёмными устройствами в широкой полосе частот (по инициативе И.В. Курчатова) на расстоянии 70 км от эпицентра взрыва [8]. При анализе сейсмограмм этого взрыва (тротилового эквивалент его составлял 400 кт) на больших расстояниях (порядка 1000 км), кроме известных типов сейсмических волн, были выделены волны, распространяющиеся со скоростью звука, то есть дошедшие до сейсмографа по воздуху и каким-то образом подействовавшие на него. Эта парадоксальная регистрация послужила толчком к разработке в Лаборатории измерительных приборов (ЛИПАН) микрографа повышенной чувствительности в соответствующем частотном диапазоне [8].

Предложение Г.А. Гамбургца и результаты ряда последующих экспериментов были востребованы в начале 1954 г., когда руководителям Атомного проекта после успешного испытания в 1953 г. «слойки» Сахарова остро потребовались объективные данные о взрывах серии термоядерных испытаний США, запланированной в Тихом океане. К 1954 г. академики И.В. Курчатов и И.К. Кикоин (рисунок 3) уже имели представление об основных методах контроля дальних ядерных взрывов.



Рисунок 3. Академики И.В. Курчатов и И.К. Кикоин – инициаторы и создатели первоначальной системы дальнего обнаружения ядерных взрывов

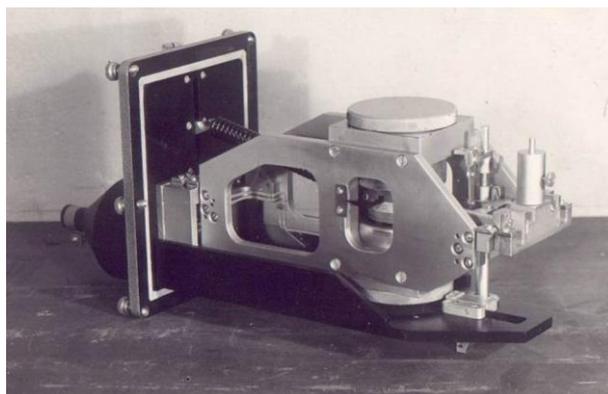
Для получения требуемых данных в состав первоначальной системы измерений было включено изучение:

- сейсмических волн, регистрируемых сейсмографами на станциях АН СССР (рисунок 4 а, б);
- воздушных волн, регистрируемых приборами, сконструированными и изготовленными в ЛИПАН (рисунок 4в);
- сигналов электромагнитного излучения (ЭМИ) ядерного взрыва в диапазоне радиоволн (рисунок 4г);
- проб радиоактивного воздуха (рисунок 4е), отбираемых у поверхности земли планшетной сетью Главного управления Гидрометслужбы (рисунок 4д), и в воздухе самолётами ВВС и ГУГМС, оборудованными фильтро-гондолами.

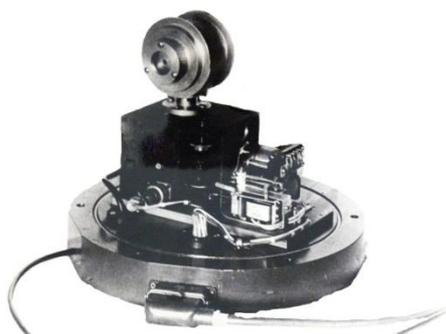
Первоначальная система измерений была организована и применена с участием сотрудников ЛИПАН и при научном руководстве академика И.К. Кикоина Министерство среднего машиностроения. С ее использованием тремя из четырех методов (за исключением ЭМИ) в первой половине 1954 г. были зарегистрированы все 6 термоядерных взрывов, проведенных США. Большой вклад внесли полёты самолётов ВВС, оснащённых фильтро-гондолами, над территориями СССР и КНР. Все получаемые данные стекались в ЛИПАН, где проводился всесторонний анализ, и делались окончательные заключения [9]. Конечно, для научно-исследовательского института – головного в Атомном проекте, – такая работа, типичная для крупной геофизической обсерватории, была непрофильной. Поэтому параллельно шли поиски путей совершенствования организации дальнего обнаружения ядерных взрывов. По инициативе И.В. Курчатова и И.К. Кикоина к экспериментальной регистрации ЭМИ по решению Министра обороны в марте 1954 г. был подключен отдел радиоразведки ГРУ Генерального штаба Советской Армии (ГШ СА). С этой целью на Дальнем Востоке было сформировано 4 отряда, оснащённых, кроме штатной аппаратуры радиоразведки, специально разработанными комплектами аппаратуры совпадения сигналов, принимаемых десятком частотно-разнесёнными каналами в коротковолновом диапазоне радиоволн (КВ диапазоне). И хотя эти комплекты удалось включить при последних двух американских взрывах тихоокеанской серии, сигналы ЭМИ зарегистрированы не были [9].



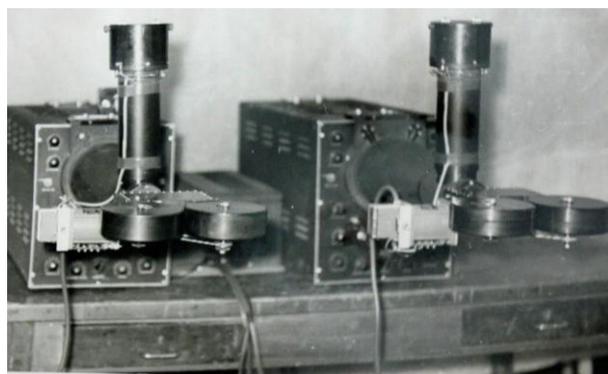
а – сейсмографы систем Никифорова, Голицына и Кириоса (на поста-
ментах в приборном сооружении сейсмической станции «Ташкент»)



б – сейсмограф Федосеенко



в – датчик микробарографа системы ЛИПАН
конструктора К.И. Балашова



г – комплект радиотехнической аппаратуры для регистрации
сигнала ЭМИ в СДВ-диапазоне конструкции
В.В. Сокольского и В.И. Стефанова (ЛИПАН)



д – воздухозаборник аэрозолей на территории ЛИПАН



е – комплект анализатора проб аэрозолей
с декадно-пересчётной установкой ДП-100

Рисунок 4. Первая аппаратура, применявшаяся для дальней регистрации ядерных взрывов

А тем временем для расширения сети наблюдения акустическим методом в ЛИПАН было изготовлено ещё 4 микробарографа (МБ), подготовлены обслуживающий персонал и проект распоряжения СМ СССР о передаче этих приборов в ГУГМС для установки на метеостанциях Дальнего Востока. Однако реализация этой идеи затягивалась и к тому же выяснилось, что скорого успеха от экспериментов с регистрацией ЭМИ в отрядах ГРУ ждать не приходится. В связи с этим начальник Службы специального наблюдения отдела радиоразведки ГРУ полковник

А.И. Устюменко (рисунок 5) предложил академику И.К. Кикоину разместить акустические приборы, предназначенные для ГУГМС, в отрядах ГРУ на Дальнем Востоке. Академик поддержал предложение и микробарографы МБ системы ЛИПАН в мае 1954 г. были развезены самолётами военно-транспортной авиации по отрядам. Аппаратура была незамедлительно установлена и начала регистрацию.



Рисунок 5. Научные руководители первоначальной системы дальнего обнаружения ядерных взрывов академик И.К. Кикоин и руководитель Службы специального контроля Министерства обороны доктор физико-математических наук генерал-майор А.И. Устюменко

Этому в немалой степени способствовало то, что экспедицию возглавлял сам А.И. Устюменко и в её составе были офицеры его немногочисленной службы и представитель ЛИПАН - разработчик прибора.

Уже 15 июня 1954 г. академики И.В. Курчатов и И.К. Кикоин обратились к министру В.А. Малышеву с предложением об организации службы наблюдения акустических сигналов, возбуждаемых в атмосфере мощными взрывами. Они писали, что совокупность микробарографических данных, полученных в системе ГРУ ГШ СА - пункты в районе городов Ворошилова-Уссурийского, Южно-Сахалинска, Петропавловска-Камчатского и порта Дальнего и на двух пунктах ЛИПАН в Москве и Дубне, «...даст возможность надёжно регистрировать мощные взрывные процессы, определять их время и место и, кроме того, делать суждения об относительной мощности этих взрывов...» [10]. С этого времени отряды ГРУ всё более становились местом, где проводились испытания новой техники, разрабатываемой научными учреждениями для радиотехнического, акустического и аэрозольного (с января 1955 г.) методов. Отсюда же исходили ценные предложения по совершенствованию испытываемой аппаратуры, которые зачастую воплощались силами инженерно-технического состава в «железе» и внедрялись на месте и в других отрядах. Таким образом, отряды ГРУ ГШ постепенно превращались в мини-обсерватории по наблюдениям за геофизическими эффектами, сопровождающими ядерные взрывы и распространяющимися глобально в геофизических сферах.

Развитие сейсмологии ядерных взрывов по-прежнему проводилось в ГЕОФИАНе при научном руководстве академика Г.А. Гамбурцева и при поддержке со стороны руководителей Атомного проекта, Минсредмаша и АН СССР. Совсекретным (особая папка) распоряжением Совета Министров СССР

от 6 февраля 1954 г. в целях «...систематического изучения и наблюдения сейсмических явлений, сопровождающих сильные взрывы, происходящие на дальних расстояниях...» в ГЕОФИАНе была создана сейсмометрическая лаборатория с двумя сейсмическими станциями. Эти станции с приборными шахтами сооружались строительными организациями Минсредмаша. К концу 1954 г. было завершено строительство полевой станции № 1 под Москвой («Михнево», в последствии - «Земля Гамбурцева») и в 1955 г. - в Хабаровском крае («Кульдур»- «Гамбурцево») [11]. Дорогостоящие приборные сооружения глубиной 20 - 30 м позволили установить сейсмические датчики на плотные коренные породы и, тем самым, значительно снизить микросейсмический шум и улучшить соотношение сигнал/шум. На станции «Михнево», кроме высокочувствительной сейсмической аппаратуры, были установлены технические средства для радиотехнического, акустического и аэрозольного методов. Более того, именно здесь впервые в 1956 г. на временном пункте регистрации, организованном специалистами Института атомной энергии и Службы специального наблюдения ГРУ, был принят сверхдлинноволновой сигнал ЭМИ в СДВ диапазоне и было показано, что задача обнаружения ядерных взрывов может быть надёжно решена только комплексной обработкой данных использованных методов. В дальнейшем приборные сооружения и техническое оснащение полевой станции № 1 были приняты в качестве базовых для развёртывания сети наблюдения за взрывами на больших расстояниях от ядерных полигонов [9].

Продолжение развития аэрозольного метода дальнего обнаружения тесно связано с именем академика Е. К. Фёдорова, который в 1952 г. сменил Г.А. Гамбурцева на посту председателя Геофизической комплексной экспедиции (ГКЭ) АН СССР по научному обеспечению поиска урановых руд. При нём в ГКЭ более широко был использован гамма-метод и новые атмосферные подходы в изучении распространения радиоактивных аэрозолей. В 1953 г. ГКЭ была передана в Минсредмаш и стала предприятием п/я 602. В 1954 г. в нём были сформированы 2 отряда специалистов. Один из них, работавший непосредственно на Семипалатинском полигоне, возглавлял Г.С. Кирдин, а другой, исследовавший образование радиоактивных следов взрывов далеко за пределами этого полигона, - Ю.А. Израэль [12]. До этого времени было лишь несколько случаев появления радиоактивности в неожиданных отдалённых местах от взрыва. Характерно первое упоминание о радиоактивном заражении местности далеко от полигона после первого советского атомного испытания. 30 августа 1949 г. в ряде геологических партий Мингео СССР, проводивших аэрогаммасъёмку в нескольких сотнях километрах от Семипалатинского полигона, возрос естественный фон, который выходил за пределы шкалы измерения при-

Курчатова и под руководством А.И. Устюменко была подготовлена программа перехода от экспериментальных работ к постоянному наблюдению за ядерными полигонами с использованием методов, озвученных И.В. Курчатовым, а также с использованием «...ещё более чувствительного» - радиотехнического метода (тогда в СССР не знали, что этот метод используется также и в системе дальнего обнаружения США). При активной поддержке И.В. Курчатова программа была положена в основу проекта постановления правительства о создании в течение 1958 - 1959 годов постоянно действующей службы контроля за ядерными испытаниями. 13 мая 1958 г. вышло в свет постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР «О мероприятиях по созданию системы контроля за испытаниями ядерного оружия» (рисунок 1). Постановлением предусматривалось создание в Министерстве обороны более широкой сети пунктов наблюдения, научного вычислительно-обрабатывающего центра, организации связи, передачи технических средств и методик Институтом атомной энергии и другими научными учреждениями создаваемой службе и выполнение в её интересах нескольких первоочередных научно-исследовательских проектов [14].

ПЕРИОД НАКОПЛЕНИЯ ЯДЕРНЫХ АРСЕНАЛОВ И ПЕРЕГОВОРОВ О РАЗОРУЖЕНИИ

После непродолжительного ядерного затишья в 1959 - 1960 гг. в последующие два года, перед заключением в августе 1963 г. Первого Московского договора о запрещении испытаний ядерного оружия в трёх средах, наблюдался всплеск испытаний. На Службу специального контроля, наряду с выполнением задачи обнаружения ядерных взрывов в любой точке земного шара, была возложена дополнительная задача по осуществлению контроля за соблюдением Договора в качестве Национальных технических средств.

В США эту роль выполнял Центр прикладных технологий ВВС (АФТАС). То что системы контроля имели сходную научно-техническую основу обнаружения ядерных взрывов, впервые выяснилось на Женевской конференции экспертов четырех западных государств во главе с США и четырех восточных государств во главе с СССР, проходившей с 1 июля по 21 августа 1958 г. Участвовавший в работе конференции по настоянию И.В. Курчатова начальник ССК полковник А.И. Устюменко приобрёл бесценный опыт общения с выдающимися учёными: И.Е. Таммом и Н.Н. Семёновым (СССР), Д. Кокрофтом и В. Пенни (Англия), Г. Бёте и Э. Лоуренсом (США) и др. Кроме того, состоялись полезные кон-

такты и дискуссии с представителями АФТАС, имевшими большой опыт дальней регистрации ядерных испытаний, особенно подземных, которые в СССР в то время ещё не проводились.

Параллельно с основной деятельностью при непосредственном руководстве генерал-майора А.И. Устюменко, принявшего от академика И.К. Кикоина (рисунок 7) эстафету неформального научного лидера работ по дальнему обнаружению ядерных испытаний, расширялась и углублялась научная база Службы специального контроля (ССК). Её основу в 1961 г. составляло научно-исследовательское управление (НИУ) 12 ЦНИИ МО из трех отделов, обеспечивавшее методическое руководство работами по регистрации и обработке сигналов ядерных взрывов, разработке технических заданий на исследования и создание новых образцов аппаратуры, а также научное обоснование долгосрочного развития ССК. Дополнительно в 1971 г. для ускорения внедрения результатов исследований и разработок был сформирован Научно-испытательный центр ССК в Москве. На его базе и НИУ 12 ЦНИИ МО в 1975 г. в Москве был создан научно-исследовательский институт по проблемам дальнего обнаружения ядерных взрывов - Специализированный филиал 12 ЦНИИ МО (ныне Научно-исследовательский центр спецконтроля – НИЦ СК). Научная деятельность НИЦ СК опиралась на экспериментальные данные, получаемые ССК при регистрации ядерных взрывов, и результаты долгосрочных договорных работ с ведущими институтами АН СССР и прикладными НИИ других министерств и ведомств. Полигонами для испытания новых разработок техники и методик служили лаборатории спецконтроля, экспериментальные лаборатории, создававшиеся для ввода в эксплуатацию и обслуживания сложных технических систем, и вычислительно-обрабатывающий центр ССК.

Фундаментальные научные проблемы постоянно возникали в связи с обнаружением ядерных взрывов, производимых на иностранных полигонах. География этих взрывов с каждым годом всё более расширялась за счёт развёртывания ядерных испытаний Францией, КНР, Индией, Пакистаном. Серьезные задачи были поставлены перед сейсмологами и радиохимиками в связи с переводом испытаний под землю и уменьшением мощности зарядов. Проблемы решались во взаимодействии ССК с многими академическими и другими научными учреждениями. Назовём лишь некоторые из этих исследований и участников.



а – академик М.А. Садовский, – инициатор опытов по дальней разведке атомных взрывов, наладивший тесное взаимодействие между ИФЗ АН СССР и ССК МО, начиная с выбора и назначения его на должность директора ИФЗ



б – академик Е.К. Фёдоров – руководитель советской делегации на Конференции экспертов по возможности контроля ядерных взрывов в 1958 г. и в качестве директора Института прикладной геофизики, в течение нескольких десятилетий обеспечивавший тесное взаимодействие с ССК МО при контроле за испытаниями ядерного оружия за рубежом, в том числе, воздушными и корабельными экспедициями



в – академик Ю.Б. Кобзарев, заведующий лабораторией Института радиоэлектроники РАН, сопровождавший научное сопровождение работ по радиотехническому методу обнаружения от момента его возникновения в 1954 г. до создания в ССК автоматизированных радиотехнических систем с разными базами



г – В.А. Троицкая, д.ф.-м.н, заведующая лабораторией ИФЗ АН СССР – инициатор и научный руководитель внедрения в практику работы ССК МО магнито-теллурического метода обнаружения высотных ядерных взрывов



д – д.ф.-м.н. В.И. Красовский - заведующий отделом Института физики атмосферы – инициатор и научный руководитель внедрения в практику работы ССК МО спектрографического метода обнаружения высотных ядерных взрывов выявлением линии лития в спектре свечения сумеречного неба



е – сподвижники директора ИФЗ АН СССР академика М.А. Садовского: П.В. Кевлишвили, руководитель спецсектора ИФЗ АН СССР, обеспечивавший разработку и оперативное внедрение в практику работы ССК МО автоматизированных средств сбора и анализа данных с использованием специализированных вычислительных устройств; Б.Т. Воробьев, начальник ОКБ ИФЗ АН СССР, обеспечивавший оперативное изготовление разработанных спецсектором и драгими подразделениями ИФЗ малых партий новой аппаратуры по заказам ССК МО; член-корреспондент АН АрмССР И.Л. Нерсесов, начальник Комплексной сейсмологической экспедиции ИФЗ АН СССР, руководивший экспериментальными работами по поиску на территории СССР мест, наиболее благоприятных для эффективной сейсмической регистрации ядерных взрывов, проводимых на зарубежных полигонах



ж – академик С.Л. Соловьёв, заведующий лабораторией Института океанологии, руководивший работами по разработке автономных донных сейсмических станций, во время экспериментальных работ в период экспедиции на НИС «Дмитрий Менделеев»

Рисунок 7. Ученые, внесшие наибольший вклад в развитие системы дальнего обнаружения ядерных взрывов

При разработке и создании в ССК большебазовой гиперболической радиотехнической системы потребовалось решить ряд сложных научных проблем. Научно-исследовательский радиофизический институт Ленинградского государственного университета под руководством профессора Г.И. Макарова исследовал вопросы распространения ЭМИ и оценки точности местоопределения радиотехнических систем с разными базами. Лаборатория академика Ю.Б. Кобзарева (рисунок 7в) Института радиоэлектроники АН СССР провела изучение помех и выделения полезного сигнала на их фоне. С целью набора данных для получения статистически достоверных результатов в условиях действия Договора о запрещении испытаний в трёх средах Энергетическим институтом АН СССР был разработан и Всесоюзным энергетическим институтом изготовлен генератор импульсных напряжений. Генератор был смонтирован в специально созданном сооружении на Семипалатинском полигоне и в течение более 10 лет имитировал ЭМИ ядерного взрыва, сигналы которого принимались на расстоянии многих тысяч километров. Проблема синхронизации регистрации сигналов ЭМИ в большебазовой системе и в лабораториях ССК решалась при активном участии Казанского государственного университета и Харьковского политехнического института.

Внедрение в практику работы ССК сейсмического метода, обучение специалистов и повышение эффективности этого метода до максимально возможного значения проводилось при активном участии Института физики Земли АН СССР во главе с директором академиком М.А. Садовским (рисунок 7е), профессором И.П. Пасечником и возглавляемой им сейсмометрической лаборатории.

Когда потребовалось создать в ССК высокочувствительные сейсмические станции и сейсмические системы группирования, экспериментальные исследования на территории СССР были выполнены Комплексной сейсмологической экспедицией ИФЗ АН СССР во главе с членом-корреспондентом АН АрмССР И.Л. Нерсесовым (рисунок 7е). Были проведены работы по отысканию наиболее эффективных мест для регистрации сигналов ядерных взрывов на действующих полигонах с наименьшими микросейсмическими шумами.

Спецсектор ИФЗ АН СССР во главе с П.В. Кевлишвили (рисунок 7е) и ОКБ ИФЗ АН СССР во главе с Б.Т. Воробьевым (рисунок 7е) осуществили разработку и оснащение систем сейсмического группирования высокочувствительной аппаратурой и комплексами лабораторий.

Лаборатория академика С.Л. Соловьёва (рисунок 7ж) Института океанологии в целях повышения эффективности глобального сейсмического контроля разработала автономные донные сейсмические станции и проводила экспериментальные работы в Мировом океане. Лаборатория А.Е. Синельникова ВНИИ

метрологии им. Д.И. Менделеева разработала впервые в стране систему метрологического обеспечения сейсмических измерений, подходящую не только для ССК, но и для Геофизической службы РАН.

Основополагающий вклад во внедрение в лаборатории ССК методов обнаружения высотных ядерных взрывов был внесён: по короткопериодным вариациям магнито-теллурического метода лабораторией профессора В.А. Троицкой (рисунок 7г) в ИФЗ АН СССР, по регистрации свечения лития в спектре сумеречного неба спектрографического метода - отделом доктора физ.-мат. наук В.И. Красовского (рисунок 7д) в Институте физики атмосферы АН СССР.

По радионуклидному методу ИПГ Минсредмаша во главе с директором академиком Е.К. Фёдоровым продолжал разработку методик отбора проб на разных высотах самолётами и аэростатами, в экспедиционных морских условиях. Институтом совместно с самолётостроительными фирмами, Научно-исследовательским физико-химическим институтом (НИФХИ), ССК провел дооборудование новых самолётов фильтро-гондолами, оснащение их новыми более эффективными фильтрматериалами. Важным направлением стала разработка способов улавливания радиоактивных газов, появляющихся в эпицентре ядерного взрыва. Представитель ИПГ Ф.Я. Ровинский стал лауреатом Государственной премии за разработку методов и технических средств контроля источников поступления радиоактивных благородных газов и трития в атмосферу в составе авторского коллектива МИФИ, руководимого директором профессором В.М. Колобашкиным. В Радиевом институте АН СССР в 1985 г. была разработана стационарная и корабельная аппаратура, предназначенная для отбора и анализа радиоактивных благородных газов. Лаборатория академика И.В. Соколова-Петрянова в НИФХИ провела исследование и разработку фильтрующих материалов для улавливания аэрозольных и газообразных продуктов ядерных взрывов, за которые была удостоена Ленинской премии. Группа А.Г. Зеленкова в ИАЭ АН СССР проводила исследования глобального распространения радиоактивных продуктов ядерных взрывов в атмосфере, Институт геохимии и аналитической химии АН СССР – методик радиохимического анализа проб. Центральный институт прогнозов Главного управления Гидрометеослужбы обеспечивал совершенствование радионуклидного метода путем разработки методик уточнённого расчёта траекторий движения воздушных масс на разных высотах и прогнозистических расчётов пути движения воздушных слоёв с радиоактивными частицами.

Благодаря этим работам всё глубже прорабатывались теоретические основы возникновения, распространения и приёма сигналов не только от ядерных взрывов, но от различных естественных источников. Это находило отражение в многочисленных

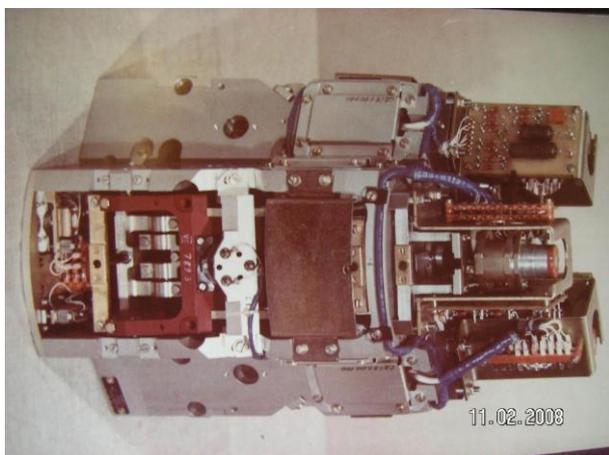
монографиях в соответствующих областях прикладной геофизики [15].

Наряду с работами по совершенствованию ССК её представителям вместе с НИЦ СК принимали участие в переговорах о прекращении ядерных испытаний, которые вновь активизировались в 1968 г. после подписания Договора о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО). Результаты регистрации ядерных испытаний, так же как уровень применяемых технических средств в ССК снова (после 1958 г.) стали важным фактором переговорного процесса.

По заказу ССК с 1979 г. была начата разработка усовершенствованного сейсмического оборудования и строительство автоматизированных сейсмических станций как основы для организации международного обмена непрерывной сейсмической информа-

цией (НСИ) в целях контроля запрещения испытаний (рисунок 8а). В 1985 г. работы были расширены для создания автоматизированной системы сейсмического контроля, способной обмениваться НСИ (рисунок 8 б) в автоматическом режиме с зарубежными системами.

Полномасштабные советско-американские переговоры по ограничению и, в конечном счёте, прекращению ядерных испытаний в 1987 г. привели к согласованию проведения Совместного эксперимента по контролю (СЭК) и после его осуществления в 1988 г. на полигонах в Неваде и Семипалатинске был открыт путь к ратификации Договора 1974 года об ограничении мощности подземных ядерных испытаний величиной 150 кт и переговорам о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний.



а – блок датчиков автоматизированного комплекса аппаратуры «Парус-2», размещаемого в скважине



б – Центр сбора и обработки информации с Центральной земной станцией спутниковой связи (на переднем плане)



в – автоматическая сейсмическая станция, передающая непрерывно информацию по спутниковому каналу связи



г – радионуклидная станция Международной системы мониторинга

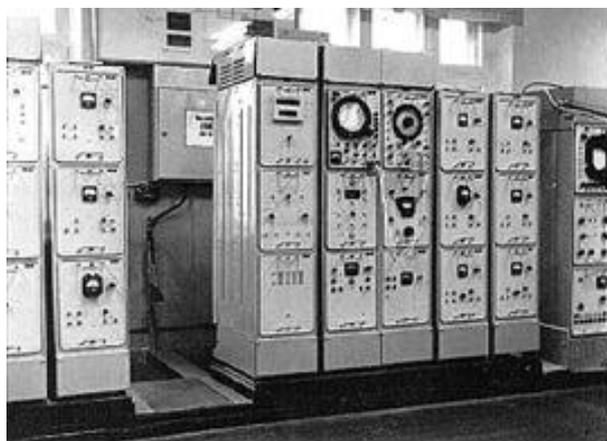
Рисунок 8. Современные технические средства дальнего обнаружения ядерных взрывов



д – сверхзвуковой самолёт-заборник, оснащённый фильтрогондолами



е – фильтро-вентиляционная установка отбора проб аэрозолей на научно-исследовательском судне



ж – автоматизированная радиотехническая аппаратура лаборатории спецконтроля

Рисунок 8. Современные технические средства дальнего обнаружения ядерных взрывов

ПОСЛЕ ХОЛОДНОЙ ВОЙНЫ

24 сентября 1996 г. был открыт для подписания Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ). Поэтому дальнейшее осуществление Атомных проектов проводилось в рамках Международной системы мониторинга (МСМ) [16]. Многие наработки по системе дальнего обнаружения ядерных взрывов используются в создаваемых в рамках ДВЗЯИ Международной системы мониторинга, Международного центра данных (МЦД), Национальных центров данных (НЦД), Инспекции на месте (ИНМ).

МСМ (рисунок 9) представляет собой 321 станцию сейсмического (50 основных и 120 вспомогательных), радионуклидного (80 станций), инфразву-

кового (60 станций) и гидроакустического (11 станций) мониторинга, а также 16 радионуклидных лабораторий (рисунок 8 г). На конец 2007 г. завершено строительство 249 станций (из них сертифицировано 214) и 7 радионуклидных лабораторий МСМ. Российский сегмент МСМ включает в себя 32 объекта - 6 сейсмических станций основной сети, 13 сейсмических станций вспомогательной сети, 4 инфразвуковые станции, 8 радионуклидных станций и радионуклидную лабораторию. Из них девять сейсмических станций вспомогательной сети находятся в ведении Геофизической службы РАН, а все остальные объекты находятся под управлением Службы специального контроля.

томатизации сбора и обработки данных, они должны иметь важное значение в развитии наук о Земле. И превращение систем обнаружения ядерных взрывов в системы контроля за их не проведением, как это предвидел И.В. Курчатов в конце 1950-х годов, становится инструментом сдерживания совершенствования ядерного оружия и переключения усилий

учёных на решение перспективных задач науки, таких, например, как прогноз землетрясений.

Уникальная глобальная международная система мониторинга должна быть использована на благо науки, для получения новых данных о строении Земли и геосфер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев, А.П. Система дальнего обнаружения ядерных взрывов и Атомный проект СССР / А.П. Васильев // История советского атомного проекта. - С.-Петербург, 2002. – С. 238 – 239.
2. Либин Письмо [Л.П. Берия] о регистрации давления воздуха в период проведения США испытаний атомных бомб от 15.06.1946 / Либин [исполняющий обязанности начальника Главного управления Гидрометеорологической службы при СМ СССР] // Атомный проект СССР. Документы и материалы. Под общ. ред. Л.Д. Рябева. - Москва – Саров: Наука-Физматлит, 2006.– Т. 2., Книга 6. – С. 142.
3. Галлер, Л.М. Письмо [Л.П. Берия] с представлением отчёта о наблюдениях за испытаниями атомных бомб США от 21.08.1946 / Л.М. Галлер, Л.П. Вавилов // Атомный проект СССР. Документы и материалы. Под общ. ред. Л.Д. Рябева. - Москва – Саров: Наука-Физматлит, 2006.– Т. 2., Книга 6. – С. 172 – 177.
4. Семенов, Н.Н. Письмо [Л.П. Берия] об отборе проб из радиоактивного облака взрыва при испытании атомных бомб США от 2 июля 1946 / Н.Н. Семенов, И.В. Куратов и А.И. Алиханов // Атомный проект СССР. Документы и материалы. Под общ. ред. Л.Д. Рябева. - Москва – Саров: Наука-Физматлит, 2006.– Т. 2., Книга 6. – С. 155.
5. Монахов, Ф. И. Справка [научного сотрудника Геофизического института АН СССР Ф.И. Монахова] по результатам наблюдений сейсмических станций 29 августа 1949 от 5.09.1949 // Атомный проект СССР. Документы и материалы. Под общ. ред. Л.Д. Рябева. - Москва – Саров: Наука-Физматлит, 2006.– Т. 2., Книга 6. – С. 665 – 667.
6. Гамбурцев, А.Г. Слежение за ядерными испытаниями / А.Г. Гамбурцев, Н.Г. Гамбурцева // Григорий Александрович Гамбурцев. - М.: Наука, 2003. – С. 159 – 161.
7. У истоков службы контроля за испытаниями ядерного оружия: Россия делает сама / Ред. С.Л. Давыдов. - М. – 1994.
8. Васильев, А.П. К истории возникновения инфразвукового метода обнаружения ядерных взрывов / А.П. Васильев // Вестник НЯЦ РК, 2003. – Вып. 2. – С. 40 – 45.
9. Васильев, А.П. Историография начального 50-летия создания в СССР системы дальнего обнаружения ядерных взрывов / А.П. Васильев // Вестник НЯЦ РК, 2006. – Вып. 2. – С. 5 – 10.
10. Документы по акустическому методу: Рождённая атомным веком / составитель и редактор А.П. Васильев. - М. – 2002 – часть 3. - С. 265.
11. Васильев, А.П. «Земля Гамбурцева» и «Гамбурцево» / А.П. Васильев // Научное наследие: малоизвестные работы и материалы из архива / отв. ред. Г. А. Гамбурцев. - М.: Наука. - С. 287 - 288, 244 - 245.
12. Васильев, А.П. Полвека вместе / А. П. Васильев // Метеорология и гидрология. – 2007. – № 10. – С. 89 – 91.
13. История создания Службы специального контроля ядерных взрывов // Рождённая атомным веком: сб. статей / составитель и редактор А.П. Васильев. – М. – 2002. – Часть 1. - С. 11 – 12.
14. Васильев, А.П. На вахте ядерной тишины / А.П. Васильев // Бюллетень по атомной энергии. – М.: ФГУП ЦНИИАТОМИНФОРМ. – 2008. - Специальный выпуск, май-июнь. – С. 108 – 109.
15. Становление и развитие научной базы ССК // Рождённая атомным веком: сб. статей / составитель и редактор А.П. Васильев. – 2002. – Часть 1. – С. 233 – 288.
16. О вкладе ССК в переговорный процесс о запрещении ядерных испытаний // Рождённая атомным веком: сб. статей / составитель и редактор А.П. Васильев. – М. – 2002. – Часть 2. – С. 137 – 164.
17. В.Н., Верховцев На страже ядерного равновесия (К 50-летию Службы специального контроля) / Верховцев В.Н. [генерал-полковник] // Красная Звезда. - 2008. - 13 мая.
18. Ежегодный доклад: 2007 год / Подготовительная комиссия Организации по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. - Вена, 2008. – июль – С. 2, 3, 14.

ДАМУЫНДА АТОМ ЖОБАСЫНЫҢ РӨЛІ ТУРАЛЫ

Васильев А.П.

Ресей Федерациясы Қорғаныс министрлігінің Арнайы бақылау қызметі, Мәскеу

ССРО атом жобасы, отандық ядролық қаруын жасауынан басқа, халық шаруашылығының көп жаңа салалары пайда болуына жол берген, білімнің барлық салалары дамуына қуатты қозғау салған, олардың арасында – Жер туралы ғылым. Мақалада, Қорғаныс министрлігінде ядролық жарылыстарын алыстан табу жүйесін құру үлгісінде бұл жобаның геофизикалық ғылымдары дамуында ролін көрсетуіне әрекет жасалған.

**ON THE IMPORTANCE OF ATOMIC PROJECT
IN THE DEVELOPMENT OF GEOPHYSICAL SCIENCES**

A.P. Vassiliev

Special Monitoring Service of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow

The USSR atomic project, besides the generation of national nuclear weapon, gave birth to many new fields of national economy, gave a strong push to development of all knowledge areas with Earth sciences among them. The article makes an attempt to show the role of the project in the development of geophysical sciences by an example of creation of remote detection system of nuclear explosions in the Ministry of Defense.

СПИСОК АВТОРОВ

Алейников Ю.В., 46
Антонюк В.И., 14
Бакланов В.В., 55, 66
Васильев А.П., 105
Горлачев И., 24
Дерявко И.И., 40
Жанкадамова А.М., 14
Жданов В.С., 55, 66
Зверев В.В., 66
Игнашев В.И., 66
Иманбеков Ж.Ж., 14
Князев Б., 24

Колобердин М., 24
Копничев Ю.Ф., 77
Кукушкин И.М., 66
Кукушкин М.И., 66
Лысухин С., 24
Малышева Е.В., 55, 66
Микиша А.В., 66
Пахниц В.А., 46
Пеньков Ф., 24
Поддубная Е.В., 14
Полешко Н.Н., 86, 93
Поляков А.Н., 14

Попов Ю.А., 46
Прозорова И., 46
Садькова А.Б., 86, 93
Слюсарев А.П., 14
Соколова И.Н., 77
Сыдыков А., 86, 93
Тимуш А.В., 86, 93
Токтаганов М.О., 46
Хачикян Г.Я., 86, 93
Цай К.В., 4
Шацкилов В.И., 86, 93
Янковский А.А., 98

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи предоставляются в виде электронной (на гибком диске или по электронной почте присоединенным (attachment) файлом) в формате MS WORD и печатной копии.

Текст печатается на листах формата А4 (210×297 мм) с полями: сверху 30 мм; снизу 30 мм; слева 20 мм; справа 20 мм, на принтере с высоким разрешением (300-600 dpi). Горизонтальное расположение листов не допускается.

Используются шрифт Times New Roman высотой 10 пунктов для обычного текста и 12 пунктов для заголовков. Пожалуйста, для заголовков используйте стили (Заголовок 1, 2...) и не используйте их для обычного текста, таблиц и подписей.

Текст печатается через одинарный междустрочный интервал, между абзацами – один пустой абзац или интервал перед абзацем 12 пунктов.

В левом верхнем углу должен быть указан индекс УДК. Название статьи печатается ниже заглавными буквами. Через 3 интервала после названия, печатаются фамилии, имена, отчества авторов и полное наименование, город и страна местонахождения организации, которую они представляют. После этого, отступив 2 пустых абзаца или с интервалом перед абзацем 24 пункта, печатается основной текст.

При написании статей необходимо придерживаться следующих требований:

- Статья должна содержать аннотации на казахском, английском и русском языках (130-150 слов) с указанием названия статьи, фамилии, имени, отчества авторов и полного названия, города и страны местонахождения организации, которую они представляют;
- Ссылки на литературные источники даются в тексте статьи цифрами в квадратных [1] скобках по мере упоминания. Список литературы следует привести по ГОСТу 7.1-2003;
- Иллюстрации (графики, схемы, диаграммы) должны быть выполнены на компьютере (ширина рисунка 8 или 14 см), либо в виде четких чертежей, выполненных тушью на белом листе формата А4. Особое внимание обратите на надписи на рисунке – они должны быть различимы при уменьшении до указанных выше размеров. На обороте рисунка проставляется его номер. В рукописном варианте на полях указывается место размещения рисунка. Рисунки должны быть представлены отдельно в одном из форматов *.tif, *.gif, *.png, *.psx, *.dxf с разрешениями 600 dpi.
- Математические формулы в тексте должны быть набраны как объект Microsoft Equation или MathType. Химические формулы и мелкие рисунки в тексте должны быть вставлены как объекты Рисунок Microsoft Word. Следует нумеровать лишь те формулы, на которые имеются ссылки.

К статье прилагаются следующие документы:

- рецензия высококвалифицированного специалиста (доктора наук) в соответствующей отрасли науки;
- выписка из протокола заседания кафедры или методического совета с рекомендацией к печати;
- акт экспертизы (экспертное заключение);
- на отдельном листе автор сообщает сведения о себе: фамилия, имя, отчество, ученая степень, должность, кафедра и указывает служебный и домашний телефоны, адрес электронной почты.

Текст должен быть тщательным образом выверен и отредактирован. В конце статья должна быть подписана автором с указанием домашнего адреса и номеров служебного и домашнего телефонов, адрес электронной почты.

Статьи, оформление которых не соответствует указанным требованиям, к публикации не допускаются.

Ответственный секретарь д.т.н. М.К. Мукушева
тел. (722-51) 2-33-35, E-mail: MUKUSHEVA@NNC.KZ

Технический редактор А.Г. Кислухин
тел. (722-51) 2-33-33, E-mail: KISLUHIN@NNC.KZ

Адрес редакции: 071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Тәуелсіздік, б.
<http://www.nnc.kz/vestnik>

© 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
071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Тәуелсіздік, б.

