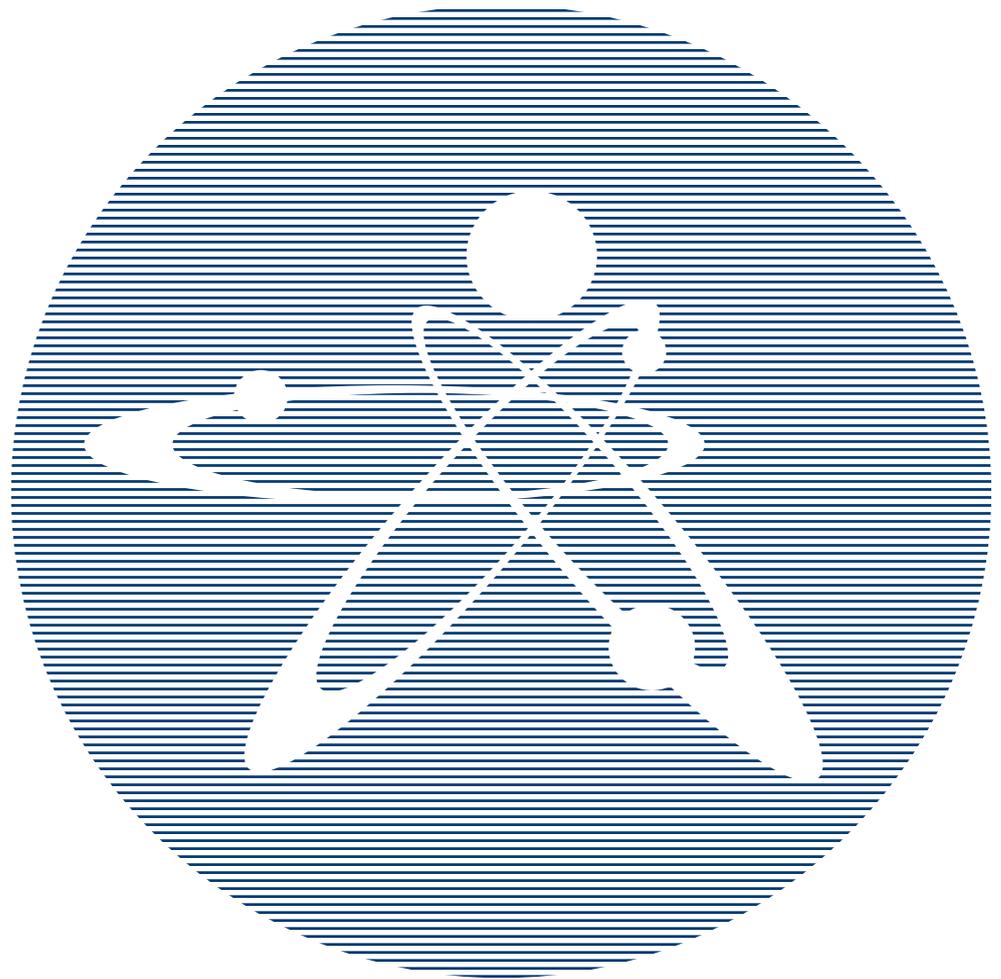


2016  
ВЫПУСК 3

ISSN 1729-7516

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ВЕСТНИК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН



# **Вестник НЯЦ РК**

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 3(67), СЕНТЯБРЬ 2016

*Издается с января 2000 г.*

**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР** – д.ф.-м.н. БАТЫРБЕКОВ Э.Г.

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:** д.ф.-м.н. СКАКОВ М.К. – заместитель главного редактора,  
д.т.н. БАТЫРБЕКОВ Г.А., д.ф.-м.н. БУРТЕБАЕВ Н.Т., доктор инженерии ВИЕЛЕБА В.К. (Польша),  
к.ф.-м.н. ВОЛКОВА Т.В., к.ф.-м.н. ВУРИМ А.Д., д.т.н. ГРАДОБОВЕВ А.В. (Россия), к.ф.-м.н. КОЗТАЕВА У.П.,  
ЛУКАШЕНКО С.Н., д.ф.-м.н. МАКСИМКИН О.П., д.ф.-м.н. МИХАЙЛОВА Н.Н., к.г.-м.н. ПОДГОРНАЯ Л.Е.,  
д.ф.-м.н. СОЛОДУХИН В.П., д.ф.-м.н. ТАЖИБАЕВА И.Л., профессор ФУДЖИ-Е (Япония)

## **ҚР ҰЯО Жаршысы**

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ  
МЕРЗІМДІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛЫ

3(67) ШЫҒАРЫМ, ҚЫРҚҮЙЕК, 2016 ЖЫЛ

## **NNC RK Bulletin**

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

ISSUE 3(67), SEPTEMBER 2016

**Периодический научно-технический журнал «Вестник НЯЦ РК», решением Комитета по контролю в сфере образования и науки включен в перечень изданий, рекомендованных для публикации материалов:**

- по физико-математическим наукам,
- по специальности 25.00.00 – науки о Земле.

В журнале представлены доклады XV ежегодной конференции-конкурса НИОКР молодых ученых и специалистов РГП НЯЦ РК (18 – 20 мая 2016 г., Курчатов, Казахстан), стр. 71-146.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ (<math>e^-</math>, <math>He^{+2}</math>, <math>Kr^{+14}</math>) НА ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ МАРТЕНСИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В НЕРЖАВЕЮЩИХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЯХ ТИПА 18-10</b> Максимкин О.П., Цай К.В.....	5
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ИНКЛЮЗИВНЫХ РЕАКЦИЙ НА ЯДРЕ <math>^{59}Co</math> ПОД ДЕЙСТВИЕМ УСКОРЕННЫХ ИОНОВ <math>^3He</math> С ЭНЕРГИЕЙ 50,5 МэВ С ВЫЛЕТОМ ПРОТОНОВ И ИОНОВ <math>^3He</math></b> Дуйсебаев А., Дуйсебаев Б.А., Жолдыбаев Т.К., Садыков Б.М., Исмаилов К.М., Насурлла М., Казамбаева А. ....	17
<b>СИСТЕМА ТРЕНИНГА ЭКСПЕРТОВ ПО ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕИЗВЕСТНЫХ ТОПЛИВНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРОВ, КАК ИНСТРУМЕНТ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ НЕЗАКОННОМУ ОБОРОТУ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ</b> Горин Н.В., Волошин Н.П., Корнеев А.А., Липилина Е.Н., Стародумова И.Г., Простаков В.И., Чуриков Ю.И., Шмаков Д.В., Скаков М.К., Чернядьев В.В. ....	23
<b>ПОПРАВКИ ВРЕМЕНИ ЦИФРОВЫХ СЕЙСМОГРАММ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «БОРОВОЕ». 1969 – 1995 гг.</b> Ан В.А., Каазик П.Б., Челюбеева Т.В. ....	30
<b>АНАЛИЗ КОЛЬЦЕВЫХ СТРУКТУР СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ ЗАПАДНОГО КАВКАЗА: ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ</b> Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. ....	36
<b>НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ S-ВОЛН И КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В ПАМИРО-ГИНДУКУШСКОМ РЕГИОНЕ: ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНЫХ КОРОВЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ</b> Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. ....	43
<b>СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ 12X18N10Т И ПОКРЫТИЙ <math>TiMoN</math>, ОБЛУЧЕННЫХ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ АЛЬФА-ЧАСТИЦАМИ</b> Уралов М.К., Ларионов А.С., Диков А.С., Кислицин С.Б. ....	51
<b>ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ В КАНАЛЕ УСКОРИТЕЛЯ С НЕЙТРАЛИЗАЦИОННЫМ ДРЕЙФОМ ИОНОВ</b> Хасенов М.У., Азаматов З.Т., Редкоречев В.И., Кулагин И.А., Надинов И.У., Уразбаев А.О., Кайканов М.И. ....	59
<b>СИНТЕЗ И СВОЙСТВА <math>Co</math> – НАНОТРУБОК</b> Сейтмағамбет Г., Шлимас Д., Козловский А., Шумская Е., Канюков Е., Кадыржанов К.К.....	65
<b>ВОЗМОЖНОСТЬ СОХРАНЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРА ИГР ПРИ КОНВЕРСИИ</b> Байгожина А.А., Иркимбеков Р.А., Мурзагалиева А.А. ....	71
<b>РАСЧЕТ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИСПЫТАНИЙ ТОПЛИВА БЫСТРОГО РЕАКТОРА СО СВИНЦОВО-ВИСМУТОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ</b> Витюк Г.А., Котов В.М., Витюк В.А., Жанболатов О.М. ....	77
<b>РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ ИСПЫТАНИЙ ТВС ПЕРСПЕКТИВНОГО РЕАКТОРА</b> Жагипарова Л.К., Пахниц А.В.....	85
<b>РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ РЕЗОНАНСНОГО САМОЭКРАНИРОВАНИЯ В АКТИВАЦИОННЫХ ИНДИКАТОРАХ ИЗ ЗОЛОТА</b> Жумадилова У.А., Прозорова И.В. ....	94

---

<b>ТЕПЛОЙ РЕАКТОР МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ВЫСОКИМ ВОСПРОИЗВОДСТВОМ ДЕЛЯЩИХСЯ ВЕЩЕСТВ</b> Иданова Д.С., Котов В.М. ....	98
<b>СИСТЕМА ПРЕДЫОНИЗАЦИИ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО ПУСКА ТОКАМАКА КТМ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА</b> Шаповалов Г.В., Тарасенко Е.В., Кусаинов А.Т. ....	105
<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО АДАПТАЦИИ МЕТОДА k<sub>0</sub>-СТАНДАРТИЗАЦИИ ИНАА ДЛЯ РЕАКТОРА ИВГ. 1М</b> Медетбеков Б.С., Алейников Ю.В., Попов Ю.А. ....	113
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОТОТИПА КОРИУМА С КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛЬЮ SUS304 ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ НА АЭС</b> Скаков М.К., Бакланов В.В., Коянбаев Е.Т., Зуев В.А., Сапатаев Е.Е., Миниязов А.Ж., Кукушкин И.М., Кожахметов Е.А. ....	120
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧЕННОГО НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ SiO<sub>2</sub>+C</b> Скаков М.К., Курбанбеков Ш.Р., Бакланов В.В., Мухамедова Н.М., Жамбаева М.К. ....	128
<b>РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ КОРИУМА И ОГНЕУПОРНЫХ БЛОКОВ ЛОВУШКИ РАСПЛАВА УСТАНОВКИ «ЛАВА-Б»</b> Рамазанова К.М., Зуев В.А., Гановичев Д.А., Хажидинов А.С., Акаев А.С. ....	134
<b>ВТОРОЙ ЭТАП МОДЕРНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ИВГ.1М</b> Коровиков А.Г., Ермаков В.А., Серикбаев Б.С. ....	140
<b>ПАМЯТИ ДУЙСЕБАЕВА АЛЬНУРА ДУЙСЕБАЕВИЧА (13.03.1933 – 05.08.2016)</b> Буртебаев Н., Джазаиров-Кахраманов В., Жолдыбаев Т.К., Пеньков Ф.М., Ибраева Е.Т., Дуйсебаев Б.А., Квочкина Т.Н., Павлова Н.Н., Жданов В.С., Садыков Б. ....	147
<b>СПИСОК АВТОРОВ</b> .....	149

УДК: 539.21:539.12.04:669.3

**ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ ( $e^-$ ,  $He^{+2}$ ,  $Kr^{+14}$ ) НА ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ МАРТЕНСИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В НЕРЖАВЕЮЩИХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЯХ ТИПА 18-10**

Максимкин О.П., Цай К.В.

*Институт ядерной физики РК, г. Алматы*

В работе представлены результаты комплексных исследований особенностей прямого  $\gamma \rightarrow \alpha$  и обратного  $\alpha \rightarrow \gamma$  мартенситных превращений в аустенитных нержавеющей хромоникелевых сталях типа 18-10, облученных импульсными электронами, высокоэнергетическими альфа-частицами ( $He^{+2}$ ), тяжелыми ионами ( $^{84}Kr^{+14}$ ), и подвергнутых последующим деформации и отжигу.

**ВВЕДЕНИЕ**

Известно, что вследствие метастабильности аустенитных нержавеющей сталей, во многих из них под действием деформаций (напряжений), температуры и облучения могут быть инициированы мартенситные фазовые  $\gamma \rightarrow \alpha'$  (или  $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha'$ ) превращения. Количество образующегося при этом ферромагнитного  $\alpha'$ -мартенсита и его морфология определяются не только химическим составом стали, но также температурой и степенью деформации. Высокотемпературный (600-800 °С) нагрев холоднодеформированных аустенитных сталей приводит к уменьшению и/или полному отжигу индуцированного деформацией ферромагнитного  $\alpha'$ -мартенсита в результате обратного  $\alpha' \rightarrow \gamma$ -перехода.

Мартенситные превращения при деформации необлученных аустенитных сталей изучены достаточно подробно для разных типов нагружения, в широком интервале температур и скоростей деформирования (например, [1-3]). В то же время сравнительно мало исследований посвящено изучению  $\gamma \rightleftharpoons \alpha'$ -переходов в сталях, предварительно подвергнутых облучению нейтронами или заряженными частицами [4-8]. Между тем актуальность таких работ для реакторного материаловедения несомненна, поскольку аустенитные нержавеющей стали служат основными конструкционными материалами бриддерных атомных реакторов и термоядерных установок, где под комплексным воздействием радиации, градиентов температур и напряжений может существенно нарушаться фазово-структурная стабильность аустенита.

Облучение высокоэнергетическими частицами сильно модифицирует исходную микроструктуру и физико-механические свойства аустенитных сталей, существенно изменяя условия протекания в них  $\gamma \rightleftharpoons \alpha'$ -переходов. В настоящее время имеется достаточное количество экспериментальных подтверждений возможности генерации ферритной фазы в аустенитных нержавеющей сталях, длительно облучаемых нейтронными потоками в промышленных реакторах («мартенсит облучения» [11]). Для имитации радиационного воздействия на материал с целью последующего его тестирования в материаловедческих

экспериментах часто используется модельное облучение на ускорителях заряженных частиц. Данные эксперименты позволяют детально изучать формирование ферритной  $\alpha'$ -фазы в аустените непосредственно под облучением при отсутствии дополнительных механических нагрузок и термонапряжений. Результаты ряда работ можно рассматривать как прямое свидетельство образования «мартенсита облучения» в реакторной стали 18-10. В частности, в [9,10] выполнены исследования изменений структурно-фазового состава стали 12X18H10T после облучения ионами  $He^{+2}$  (альфа-частицами) с энергией 40 кэВ и протонами, которые проводились методами рентгеноструктурного анализа и мессбауэровской спектроскопии в геометрии обратного рассеяния с регистрацией электронов внутренней конверсии. Глубина проникновения альфа-частиц в образец была сопоставима с толщиной материала, доступного для зондирования приповерхностного слоя (до 100-150 мкм) методом мессбауэровской спектроскопии, что позволило детально анализировать фазовое состояние стали в зоне радиационного повреждения. Проведенные эксперименты подтвердили возникновение  $\alpha'$ -фазы в облученных  $He^{+2}$  образцах. Аналогично облучение протонами с энергией 30 МэВ (флюенс  $5 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при  $T < 190 \text{ K}$ ) также индуцировало прямое  $\gamma \rightarrow \alpha'$  превращение в стали 18-10.

На сегодняшний день проведены также систематизированные исследования обратного мартенситного  $\alpha' \rightarrow \gamma$  превращения [12,13]. Так, на основании анализа мессбауэровских данных по изучению стальных образцов, облученных ионами  $He^{+2}$  (40 кэВ), в [9] был сделан вывод, что особенностью кинетики обратного  $\alpha' \rightarrow \gamma$  превращения при последовательных отжигах является увеличение подвижности атомов хрома и их миграция в растянутые области решетки, что приводит к релаксации напряжений. В результате ближайшее окружение (1-3 координационные сферы) атомов железа обогащается атомами никеля и образуются сегрегации хрома. При этом наблюдается увеличение магнитного поля на ядрах железа в кристаллической решетке мартенсита от 263 кэВ в облученной неотожженной стали до 340 кэВ стали, облученной при 600 °С.

Данная работа представляет краткий обзор результатов изучения  $\gamma \leftrightarrow \alpha'$ -переходов в аустенитных хромоникелевых сталях типа 18-10, облученных высокоэнергетическими заряженными частицами.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовали две аустенитные нержавеющие стали 12X18H10T и 12X18H9T, различающиеся по содержанию никеля. Химический состав сталей приведен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав исследуемых хромоникелевых сталей

Элемент	Конц-я, вес. %
Fe	Баланс
Ni	9.00-10.66
Cr	17.00
Ti	0.50
C	0.12
Mn	1.67
Si	0.34
P	0.032
S	0.013

Плоские образцы в виде двойной лопатки с размерами рабочей части  $10.0 \times 3.5 \times 0.3$  мм<sup>3</sup> аустенизировали при температуре 1050 °С (30 мин) и закаливали в воду. Наряду с тем были подготовлены образцы в виде прямоугольных пластин (с аналогичной термообработкой) с размерами рабочей части  $15 \times 20$  мм, толщина которых после прокатки составляла 1 мм.

Термообработанные плоские образцы подвергали облучению высоко-энергетическими заряженными частицами с использованием различных схем облучения:

- Имплантация  $He^{+2}$  с энергией 40-50 МэВ равномерно по объему до концентрации  $10^{-3}$  -  $10^{-2}$  ат. % на изохронном циклотроне У-150 (ИЯФ, Алматы).

- «Профильное» облучение  $He^{+2}$  с энергией 50 МэВ (У-150) через маску.

- Облучение импульсными электронными пучками (ИЭП) на ускорителях «Нептун» (КАЗНТУ, Алматы) и «Кальмар» (НАЭ им И.В. Курчатова, Москва) в вакууме ( $1.3 \cdot 10^{-2}$  Па) при плотностях мощности пучка от  $5 \times 10^7$  до  $5 \times 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup> и энергией в диапазоне от 150 до 520 кэВ с использованием широких электронных пучков, диаметром от 15 до 50 мм. Интенсивность пучка по центру периферии пятна различалась не более, чем на 20%. Образцы, облучали либо однократными импульсами с одной стороны, либо, в случае образцов для механических испытаний – с обеих сторон.

- Облучение ионами криптона  $^{84}Kr^{+14}$  с энергией 1.56 МэВ на нуклон на ускорителе тяжелых ионов DC-60 (филиал ИЯФ, Астана). Расчетная температура облучения не превышала 150 °С, максимальный флюенс составил  $2 \cdot 10^{18}$  част/см<sup>2</sup>.

В качестве основных методов исследования тонкой структуры стали были выбраны просвечивающая и растровая электронная микроскопия (электронные микроскопы JEM-100CX и JSH-7500F, соответственно). Растровый микроскоп был оснащен системами EDS и EBSD анализа. Наряду с этим для контроля использовали метод рентгеноструктурного фазового анализа (дифрактометрический комплекс D8 ADVANCE (Bruker AXS GmbH) с использованием  $CoK\alpha$ -излучения).

Количественное содержание ферромагнитной фазы ( $M_f$ ) в стальных образцах после облучения и/или деформации оценивалось с помощью ферритоскопа Fischer MP-30 с погрешностью измерений 0.01%.

Механические испытания на одноосное растяжение проводили на универсальной испытательной машине «Инстрон-1195» со скоростью 0.5 мм/мин при комнатной, либо пониженной ( $-100$  °С) температурах. В ходе деформирования получали инженерные и «истинные» диаграммы растяжения «напряжение  $\sigma$  – деформация  $\varepsilon$ », « $\sigma_i - \varepsilon_i$ », а также кривые накопления ферромагнитной фазы « $M_f - \varepsilon$ ». При этом содержание  $\alpha'$ -фазы измеряли как в шейке деформируемого образца, так и в участках, далеко отстоящих от нее. Для определения локальных «истинных» напряжений и деформаций был использован метод цифровой оптической экстензометрии [14], либо пошаговое прерывание растяжения с целью измерения текущих значений площадей поперечных сечений в различных точках на рабочей длине образца.

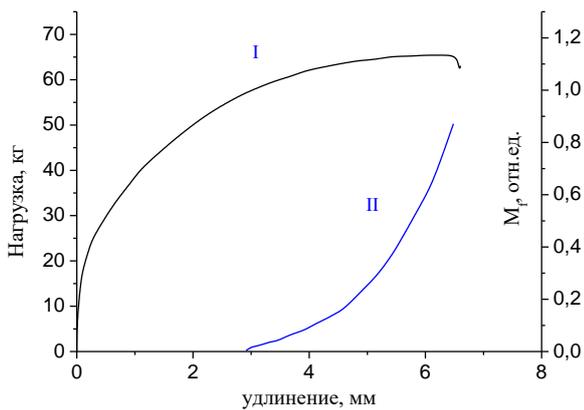
В ряде случаев при изучении обратного  $\alpha' \rightarrow \gamma$  превращения деформацию образцов прерывали по достижению максимальной нагрузки (предела прочности), которой на инженерной диаграмме растяжения соответствовала деформация  $\delta_{равн}$ . Затем деформированные образцы, содержащие определенное количество  $\alpha'$ -фазы, подвергали последовательным изохронным отжигам (30 мин.) в вакууме в интервале температур 300-800 °С. Начальный вакуум при этом составлял  $10^{-4}$  Па, при выходе на заданную температуру вакуум понижался до  $2 \cdot 10^{-3}$  Па.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

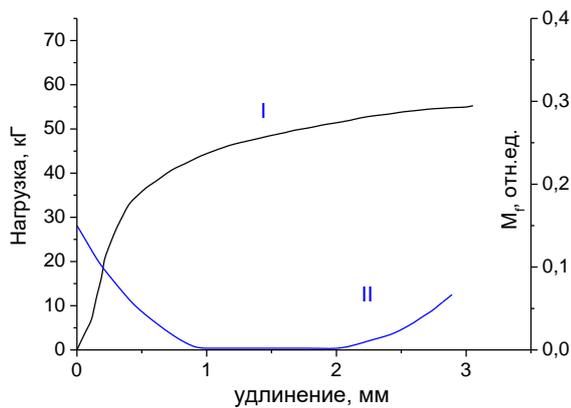
##### Мартенситные превращения в стали 18-10, облученной импульсными электронными пучками

В результате облучения ИЭП в образцах стали 12X18H10T при определенных значениях энергии и плотности мощности пучка, в диапазоне  $E = 150-300$  кэВ и  $g = 5 \times 10^8 - 4 \times 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>, наблюдалось образование ферромагнитной  $\alpha'$ -фазы с ОЦК-структурой [15- 18]. Под действием ИЭП, в случае облучения с одной стороны, наибольшее количество  $\alpha'$ -фазы регистрировалось на поверхности образца, противоположной поверхности облучения. Приложение внешней нагрузки (одноосного растяжения) к облучен-

ным образцам показало (рисунок 1), что при относительно малых деформациях  $\varepsilon < 0.2$  содержание  $\alpha'$ -фазы в стали уменьшилось вплоть до полного исчезновения ( $M_f = 0$ ) при  $\varepsilon \approx 0.1-0.2$  [18]. При более высоких деформациях  $\alpha'$ -фаза в образцах появлялась вновь и ее содержание в аустените монотонно росло с увеличением деформации по известным закономерностям [4]. К моменту разрыва объемная доля  $\alpha'$ -фазы в облученных образцах в 4 раза превышала ее содержание при аналогичной деформации в необлученных образцах.



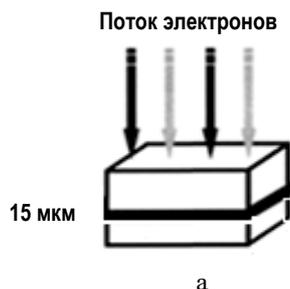
а



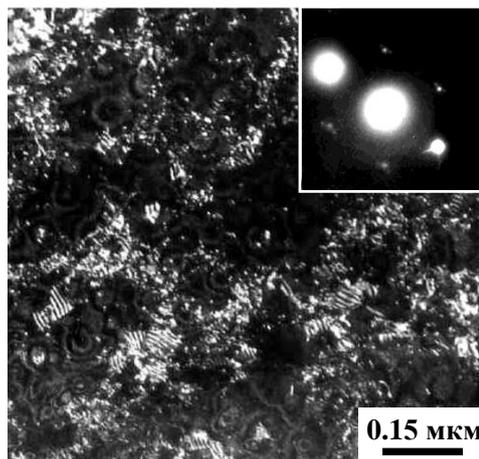
б

Рисунок 1 – Инженерные диаграммы растяжения (I) и кривые накопления  $\alpha'$ -фазы (II) для образцов стали 12X18H10T, необлученной (а) и облученной ИЭП ( $E=180$  кэВ,  $g=3.6 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>) на ускорителе «Кальмар» (б)

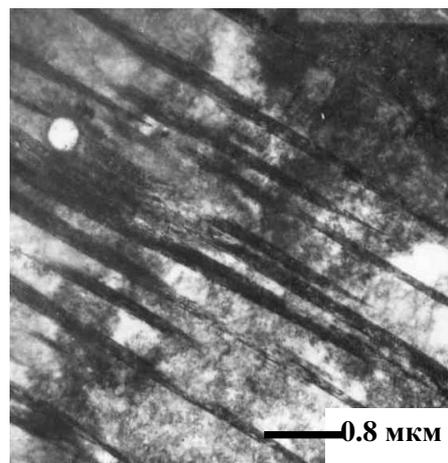
В [16] исследовали изменения дефектной структуры и фазового состава аустенитной стали 18-10, облученной ИЭП (540КэВ, плотность мощности  $5 \times 10^8$  Вт/см) на различной глубине от поверхности облучения. Показано, что под воздействием ИЭП условия, благоприятствующие образованию  $\alpha'$ -фазы в стали, формируются на глубине 15-20 мкм от поверхности облучения. Мартенситная фаза зарождается в узлах ячеистой дислокационной субструктуры (рисунок 2б).



а



б



в

а – схема облучения; б – зарождение мартенситной  $\alpha'$ -фазы на пересечении дислокационных ячеек, 15-20 мкм от поверхности облучения; в – реечный мартенсит, ~300 мкм от поверхности облучения.

Рисунок 2. Микроструктура стали 12X18H10T после облучения ИЭП ( $g = 5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>;  $U = 540$  кВ) на различной глубине от поверхности облучения

Возможность образования мартенситной  $\alpha'$ -фазы в стальных образцах, облученных ИЭП, можно объяснить эффектом воздействия ударной волны импульсного потока. Сверхвысокие скорости нагрева (до  $10^9$  °C/c) до температур плавления и последующее охлаждение тонкого приповерхностного слоя материала ( $10^{-7} - 10^{-6}$  м) за счет теплоотвода в основной объем материала со скоростью  $10^{-4} - 10^{-9}$  °C/c порождают предельные градиенты температу-

ры (до  $10^7 - 10^8$  °C/c), что сопровождается появлением в приповерхностных слоях материала критических полей напряжений [19]. В данных условиях реализуется нестабильное состояние кристаллической решетки материала [20], облегчающее перестройку структуры по мартенситному механизму. Действие ударной волны от ИЭП и, соответственно, перестройка структуры весьма кратковременно, порядка нескольких микросекунд.

Проведенные эксперименты позволили качественно установить тип мартенсита, выделяющегося после облучения. Это мартенсит сжатия, формирующийся в образованных ударной волной сжатых микроробъемках аустенитной матрицы. После приложения извне напряжений растяжения к облученному образцу, объемная доля мартенсита сжатия уменьшается практически до нуля (рисунок 1), а повышение внешних растягивающих напряжений с ростом деформации приводят к образованию в образце мартенсита растяжения [18].

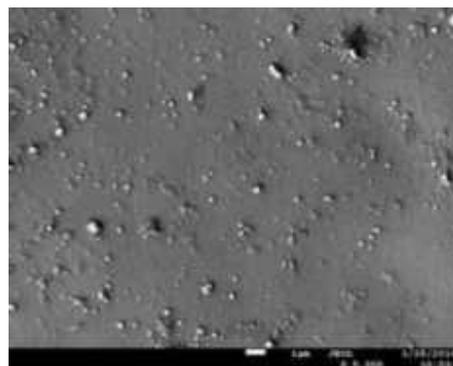
Наряду с фазово-структурной модификацией приповерхностных слоев образца со стороны поверхности облучения в результате ударного сжатия наблюдалось образование колоний реечного мартенсита на поверхности, противоположной поверхности облучения (рисунок 2б). Учитывая, что длительность ИЭП не превышала 100 нс, был установлен временной порог зарождения  $\alpha$ -фазы. Данная величина несколько меньше, чем известное из литературы минимальное время зарождения  $\alpha$ -мартенсита (2 мкс), полученное в экспериментах по высокоскоростному дифференцированию (метод налетающих пластин) или взрывному воздействию.

#### Изменение структурно-фазового состава приповерхностных слоев стали 12X18H10T, наблюдаемое после облучения тяжелыми ионами $^{84}Kr^{+14}$

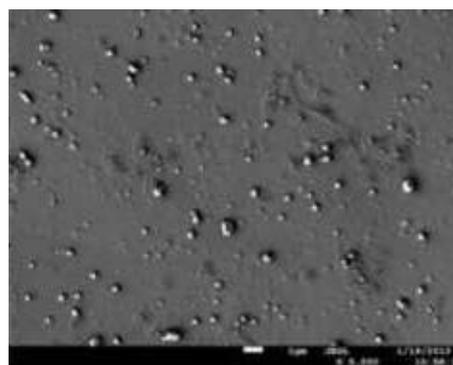
Наибольшее воздействие потоки бомбардирующих заряженных частиц оказывают на поверхность облучения и тонкий приповерхностный слой. Изменение фазового состава в данном слое и на поверхности образца может не фиксироваться стандартными методами фазового анализа (рентгеновская дифрактометрия, мессбауэровская спектроскопия, магнитометрический контроль) в силу крайне малых количеств образующихся новых фаз. В этом случае наибольшую эффективность может дать метод EBSD-анализа, основанный на дифракции обратнорассеянных электронов (растровый электронный микроскоп JSM-7500F).

Плоские аустенизированные образцы стали 12X18H10T облучали ионами криптона  $^{84}Kr^{+14}$  с энергией 1.56 МэВ на ускорителе тяжелых ионов DC-60 до флюенсов в диапазоне  $1 \times 10^{15} - 9 \times 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> [21]. Температура мишени во время облучения не превышала 100 °C. Измерения намагниченности и рентгеновская дифрактометрия позволили

идентифицировать образование мартенситной  $\alpha'$ -фазы (ОЦК) в образцах с флюенсом, превышающим  $4 \times 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>. Фазовый EBSD-анализ проводился на образцах с меньшими флюенсами,  $1 \times 10^{15}$  и  $4 \times 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>, где вышеуказанные методики показали недостаточную чувствительность. На рисунке 3 представлены микрофотографии поверхности облучения исследуемых образцов, с многочисленными карбидными включениями и газонаполненными блистерами. На рисунке 4 приведены карты фаз, снятые в режиме EBSD.



а

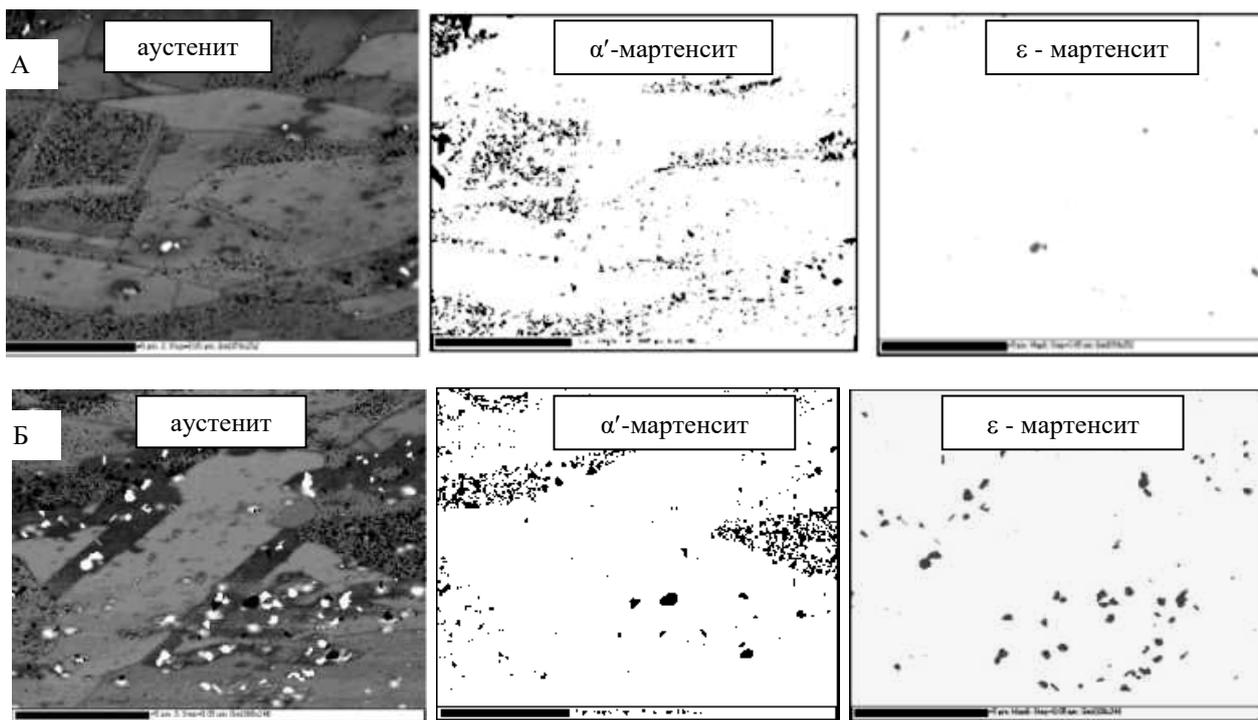


б

а –  $1 \times 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>; б –  $4 \times 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>.

Рисунок 3. Структура поверхности образцов стали 12X18H10T, после облучения ионами  $^{84}Kr^{+14}$  с энергией 1,56 МэВ/нуклон при различных флюенсах облучения ( $\times 7500$ )

Примененная методика поверхностного анализа показала наличие микровключений  $\alpha$  (ОЦК) и  $\epsilon$  (ГПУ) - мартенситных фаз. Особенностью  $\alpha$ -фазы является чрезвычайная мелкодисперсность (менее 0.1 микрона) наряду с крайне малым количеством крупных кристаллитов. Обнаружено, что  $\alpha$ -мартенсит появляется в зернах преимущественно с ориентацией [001] и тяготеет к границам зерен. В то же время  $\epsilon$ -мартенсит зарождается, в основном, в зернах с ориентацией [111]. Заметим, что в зернах с ориентацией (101) формируются газовые блистеры, тогда как  $\alpha$ -фаза в подобных зернах с блистерами отсутствует.



А – флюенс  $1 \times 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>; Б – флюенс  $4 \times 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>.

Рисунок 4. Карта фаз, снятая в режиме EBSD, для образца стали 12X18H10T, облученного ионами  $^{84}Kr$  (шаг сканирования 0,05 мкм) (x7500)

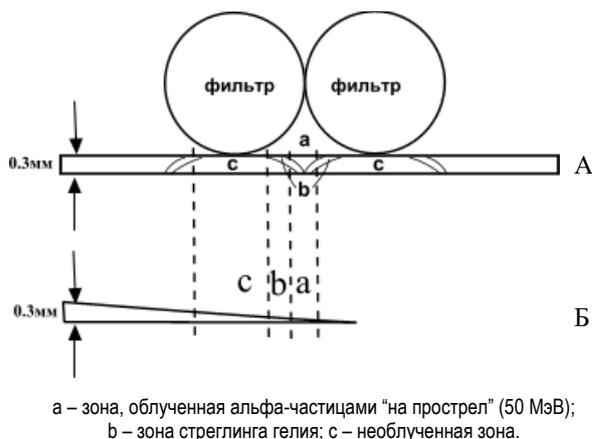
Установлено, что с ростом флюенса ионов количество образующейся ферромагнитной  $\alpha$ -фазы несколько возрастает. Так, например, содержание  $\alpha$ -фазы в облученных образцах с флюенсами  $(1-4) \times 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> составляет 8-9%, а  $\epsilon$ -фазы – 1-2%, соответственно. При этом преобладающий размер кристаллитов  $\alpha$ -фазы практически не изменяется. Последнее свидетельствует о том, что увеличение доли мартенсита идет за счет образования более высокой плотности зародышей без возрастания размеров выделений.

#### Мартенситные превращения под действием внутренних напряжений в хромоникелевых сталях, облученных ионами $He^{+2}$

Облучение образцов стали 12X18H9T через маску ионами  $He^{+2}$  дает возможность получить в пределах рабочей части одного образца несколько зон, отличающихся по характеру радиационной обработки: необлученную, облученную «на прострел» и зону стрэгглинга, легированную гелием до  $10^{-2}$  ат.% (рисунок 5) [6,22].

После облучения образцы с гелием подвергли пострациональному отжигу при 1050 °С (30 мин) с целью формирования в микроструктуре гелиевых пузырьков. Отожженные образцы охлаждали в жидком азоте в течение 30 минут. В микроструктуре термообработанных образцов на границах зон без гелия и зон с гелиевыми пузырьками наблюдали не только зародыши, но и крупные пакеты мартенситной  $\alpha$ -фазы в виде пластин, составляющих тетраэд-

ры в трехмерной развертке (рисунок 6). Зародыши  $\alpha$ -фазы наблюдались в местах взаимного пересечения дефектов упаковки. Предполагается, что зародыши растут характерными уступами, образуя, в итоге пластины с заостренными концами. Согласно анализу электронограмм структура на рисунке 6б содержит три фазы:  $\gamma$ -аустенит (ГЦК),  $\epsilon$ -фазу (ГПУ) и  $\alpha'$ -фазу (ОЦК) (рисунок 7). Это свидетельствует о возможности мартенситных переходов не только по схеме ГЦК→ОЦК, но и по схеме ГЦК→ГПУ→ОЦК с появлением промежуточного  $\epsilon$ -мартенсита.

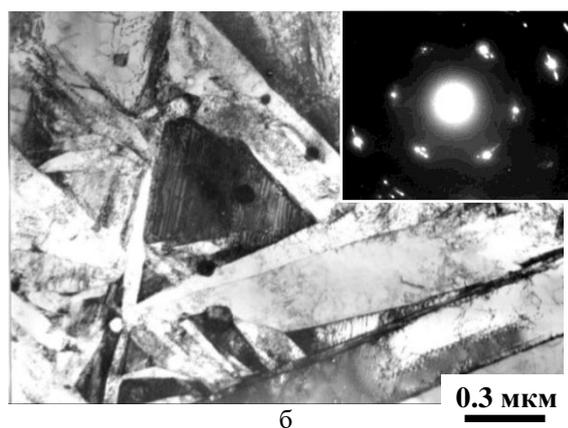
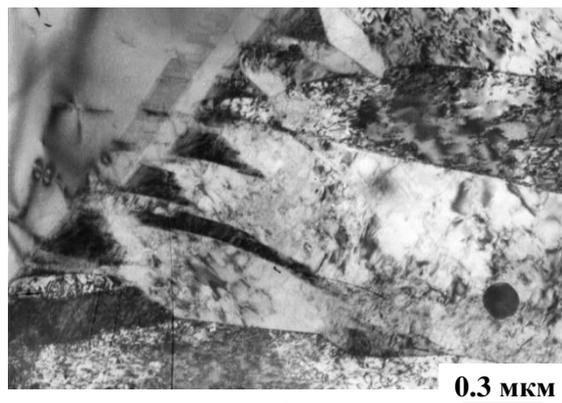


а – зона, облученная альфа-частицами «на прострел» (50 МэВ);  
б – зона стрэгглинга гелия; с – необлученная зона.

Рисунок 5. Профили облученного стального образца (А) и приготовленного из него ПЭМ-объекта (Б), содержащего зоны 3-х типов

Необходимо отметить, что в необлученных стальных образцах примененная в данном эксперименте термообработка не приводила к образованию мартенситной  $\alpha'$ -фазы.

Формирующаяся под действием ударных волн и термонапряжений (рисунок 6) мартенситная  $\alpha'$ -фаза морфологически существенно отличается от мартенсита деформации в сталях 18-10 (см. в следующем параграфе), а по плотности залегания мартенситных пластин напоминает мартенсит охлаждения в углеродистых сталях.



а – зародыши  $\alpha'$ -фазы, б – «массивные» пакеты мартенсита

Рисунок 6. Структура мартенситной  $\alpha'$ -фазы в нержавеющей стали 12X18H9T после облучения ионами  $He^{+2}$  (зоны имплантации гелием до концентрации  $\sim 10^{-2}$  ат%), отжига при 1050 °C (30 мин) и охлаждения в жидком азоте

Формирование  $\alpha'$ -мартенсита в процессе холодной деформации подчиняется схожим закономерностям как в необлученных, так и в облученных альфа-частицами стальных образцах [7, 8], что объективно доказывают данные магнитометрического контроля. На начальных стадиях растяжения распределение  $\alpha'$ -фазы однородно по всей рабочей длине образца, с началом макролокализации деформации, скорость образования и накопления  $\alpha'$ -фазы в области будущей стационарной шейки значительно возрастает по сравнению с другими участками образца (рисунок 8).

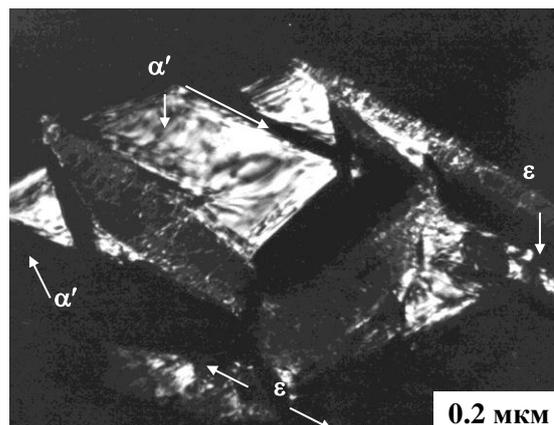


Рисунок 7. Кристаллы мартенситных фаз в стали 12X18H9T, темнопольное изображение (область вблизи границы раздела зон с гелиевыми порами и без гелия)

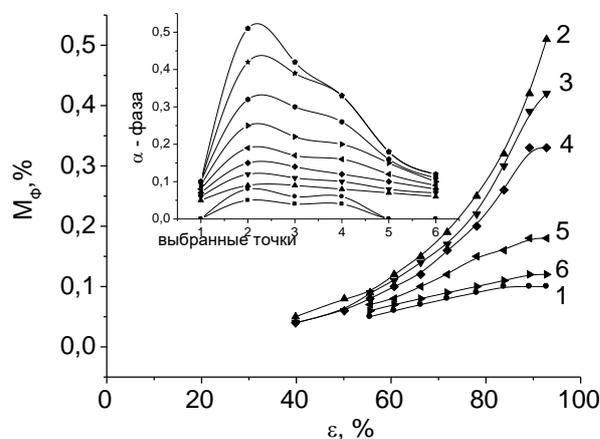
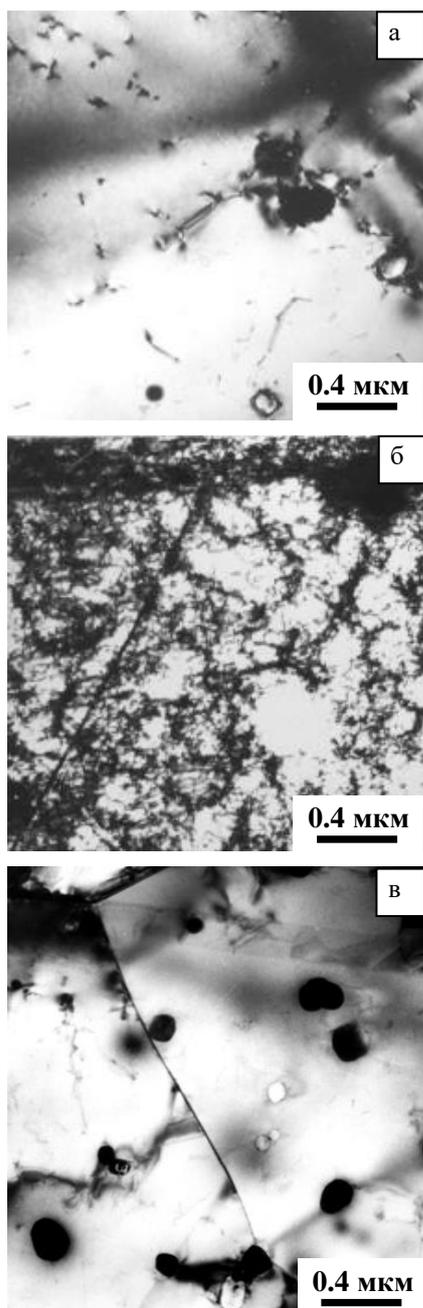


Рисунок 8. Распределения ферромагнитной  $\alpha'$ -фазы по длине деформируемого образца стали 12X18H10T при различных степенях деформации

Зависимость количественного содержания мартенсита  $M_f$  от деформации  $\epsilon$  лучше всего описывается функцией экспоненциального вида  $M_f / (1 - M_f) = A \epsilon^B$ , где  $M_f$  - доля  $\alpha'$ -фазы в объемных %,  $A$  и  $B$  - константы [8, 23]. Облучение поверхности или объема образца ускоренными частицами приводит к дополнительному упрочнению из-за появления радиационных дефектов в микроструктуре. В условиях внешнего нагружения радиационно-индуцированные дефекты играют роль центров критических напряжений зарождения новой фазы. Важное значение также имеет радиационно-индуцированное изменение элементного состава твердого раствора вблизи структурных дефектов, следствием чего может быть уменьшение энергии дефекта упаковки и облегчение структурной перестройки атомов. В результате предварительное облучение облегчает протекание прямого  $\gamma \rightarrow \alpha'$  превращения и обуславливает более высокую интенсивность накопления мартенситной фазы с ростом деформации по сравнению с необлученной сталью.

### Влияние гелия на процессы старения в хромоникелевых сталях

Гелий, как продукт ядерных реакций, является неизменным спутником нейтронного облучения и остается в облученном материале во время многолетнего хранения. Пострадиационный отжиг при повышенных температурах не приводит к полному удалению гелия из матрицы в отличие от большинства типов радиационных дефектов, а стимулирует зарождение и коалесценцию гелиевых пузырьков.



а – после длительного старения; б – после старения и отжига при 550 °С (30 минут); в – после старения и отжига при 900 °С (30 минут)

Рисунок 9. Микроструктура стали 12Х18Н10Т, однородно имплантированной гелием до  $10^{-3}$  ат.%

В работе [24] рассматривали влияние старения и термообработки на микроструктуру и свойства легированной гелием хромоникелевой стали. Несмотря на внешнее сходство тонкой структуры в стали с гелием ( $10^{-3}$  ат.%), состаренной при 20 °С в течение 16 лет (рисунок 9а), с аустенизированной микроструктурой, последующая термообработка при 550 °С (30 мин) приводит к неожиданному эффекту – появлению в материале упрочняющей дислокационной субструктуры (рисунок 9б). После отжига при температуре  $\geq 900$  °С имеем микроструктуру с крупными гелиевыми пузырьками и карбидами TiC с незначительным количеством дислокаций.

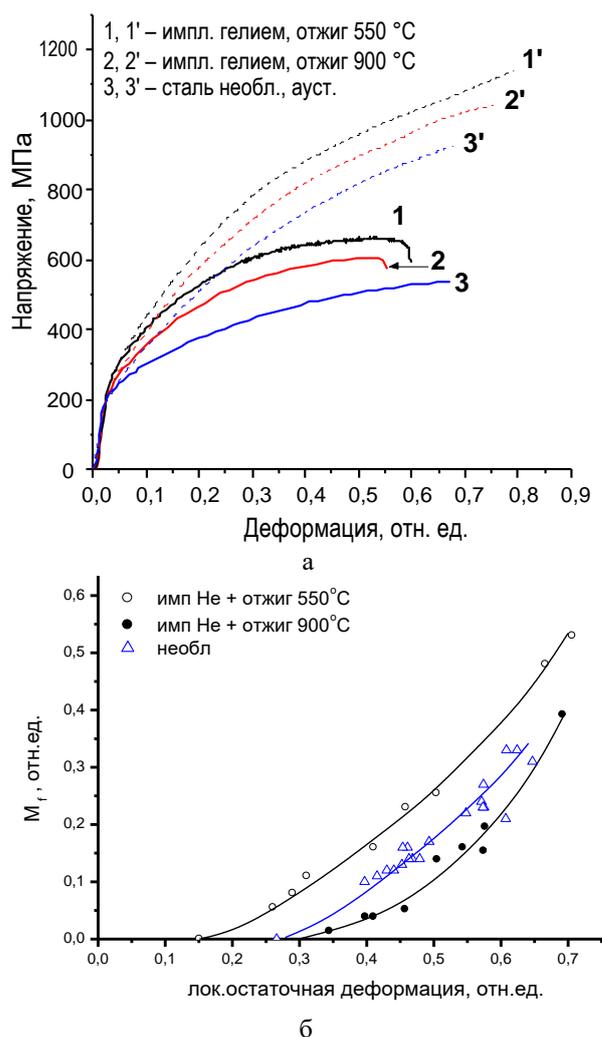


Рисунок 10. Диаграммы растяжения (а) в условных координатах « $\sigma - \delta$ » (кривые 1-3) и истинных « $\sigma_t - \varepsilon_t$ » (кривые 1' - 3'), а также кривые накопления ферромагнитной  $\alpha'$ -фазы (б) в образцах аустенитной стали 12Х18Н10Т, необлученной и имплантированной гелием до  $10^{-3}$  ат.% после различных режимов термообработки

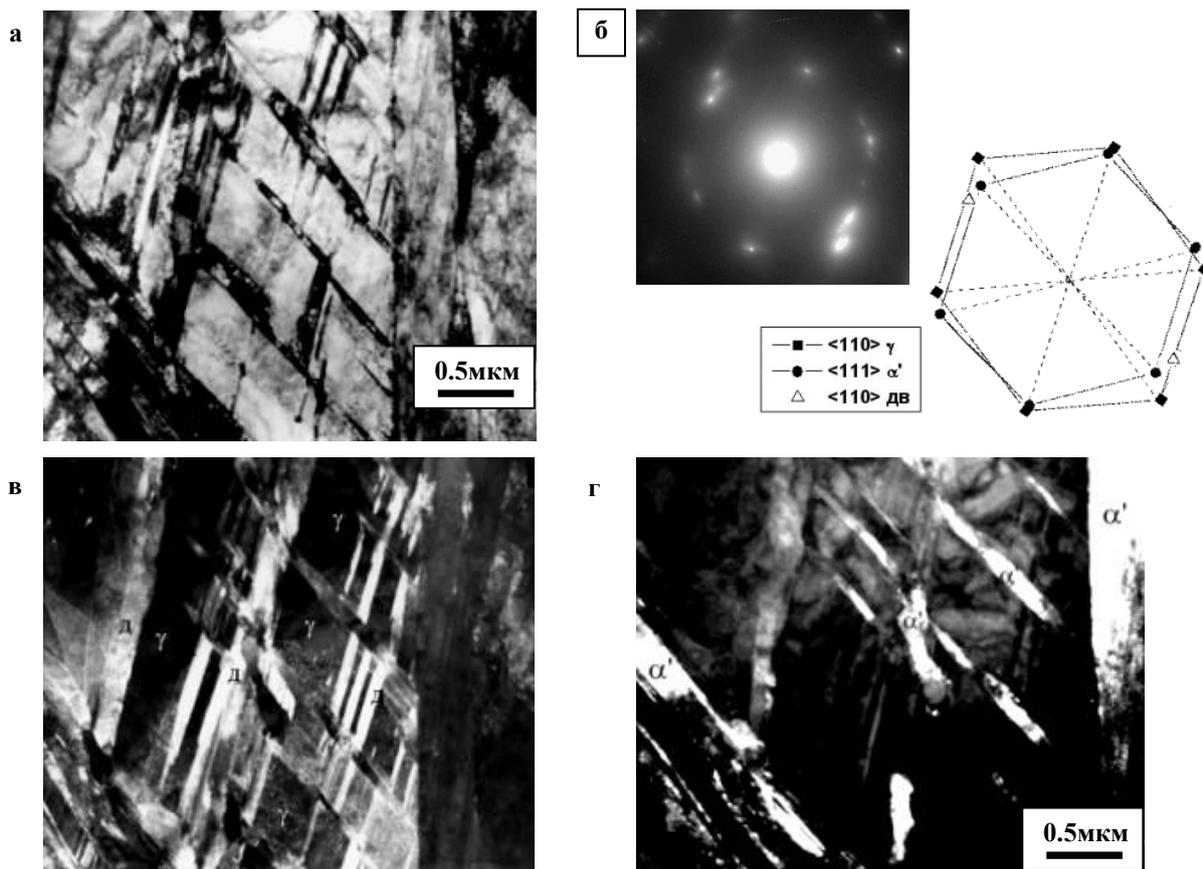
Показано, что в стали с высокой плотностью концентраторов напряжений, обусловленных развитой дислокационной структурой, при высоком предварительном упрочнении, мартенсит деформации

начинает выделяться при более низких значениях локальных деформаций и напряжений, по сравнению со сталью, где предварительная плотность дефектов мала ( $\sigma_{сги} = 670$  МПа и  $\epsilon_{сги} = 0.15$  для  $550^\circ\text{C}$ ,  $\sigma_{сги} = 815$  МПа и  $\epsilon_{сги} = 0.3$  для  $900^\circ\text{C}$ ). К моменту разрушения количество мартенситной фазы, накопленной в образце, в случае отжига при  $550^\circ\text{C}$  выше, чем для отжига при  $900^\circ\text{C}$ .

Как показали ПЭМ-исследования, вероятность появления мартенсита деформации в образцах с гелием выше на участках, где одновременно имеет место механическое двойникование в аустенитной матрице по одной или двум системам (рисунок 11). При этом в матрице образуется сильно фрагментированная структура смешанного типа, включающая сегменты  $\gamma$ -аустенита с сохраняющейся ячеистой дислокационной структурой (с диаметром ячеек до 1.5-3 мкм), двойники  $\gamma$ -фазы с плоскостью двойникования типа  $(1\bar{1}1)$ , а также пластины  $\alpha'$ -мартенсита. Для  $\alpha'$ -мартенсита в исследуемой стали выполняется ориентационное соотношение Курдюмова-За-

кса  $[110] \parallel [\bar{1}11]$ . Разориентировка групп ячеек дислокационной сетки относительно соседей на несколько градусов. Угол между аустенитными двойниками и пластинами  $\alpha'$ -мартенсита составляет  $\sim 60^\circ$ .

Так как возможности роста мартенситного кристалла ограничиваются размерами фрагментов аустенитной матрицы, внутри которой он зародился, то естественными пределами роста могут служить границы зерен, субзерен, механических двойников, а также дислокационные скопления. В случае облученной стали, радиационные индуцированные гелиевые пузырьки и частицы вторичных фаз, не являются существенным препятствием для развития мартенситных пластин, но могут играть значимую роль в создании критических напряжений, необходимых для возникновения зародышей мартенситной фазы. Роль  $\epsilon$ -фазы в мартенситных превращениях в хромоникелевых сталях относительно невелика, сама фаза обнаружена в виде сверхтонких плоскопараллельных пластин.



а) светлое поле; б) электронограмма; в) двойники и  $\gamma$ -аустенит; г)  $\alpha'$ -мартенсит в рефлексе  $(\bar{1}0\bar{1})_{\alpha}$ .

Рисунок 11. Типичная микроструктура имплантированной гелием до  $10^{-3}$  ат.% стали 12X18H10Г при  $\epsilon = 0.7$

**Эффект обратного мартенситного превращения в стальных образцах, имплантированных гелием**

Исследованию эффекта обратного мартенситного  $\alpha' \rightarrow \gamma$  превращения в облученных высокоэнергетическими частицами и деформированных нержавеющей хромоникелевых сталях посвящен ряд работ [25, 26]. Особенности  $\alpha' \rightarrow \gamma$  превращения можно достаточно полно рассмотреть на примере образцов стали 12X18H9T, имплантированных гелием до  $10^{-3}$  ат.%, деформированных с целью создания в объеме определенного количества ферромагнитной  $\alpha'$ -фазы, а затем подвергнутых последовательным изохронным отжигам в интервале 300-600 °С. Типичная картина изменений намагниченности  $M_f$  в различных точках деформированного стального образца с ростом температуры изохронного (30мин) отжига показана на рисунке 12. Для каждой выбранной точки на рабочей части образца построены зависимости величин  $M_f$  и микротвердости  $H_{\mu}$  от температуры отжига (рисунок 13).

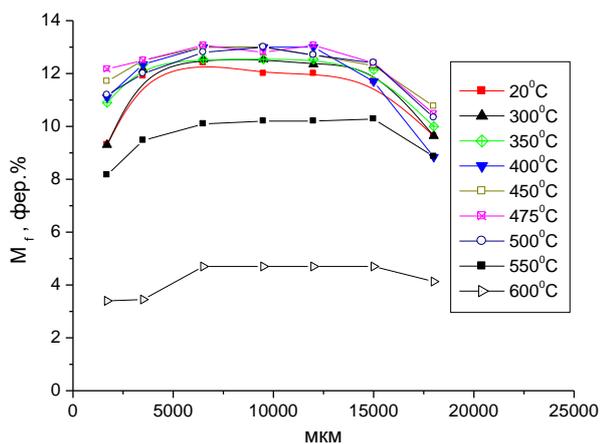
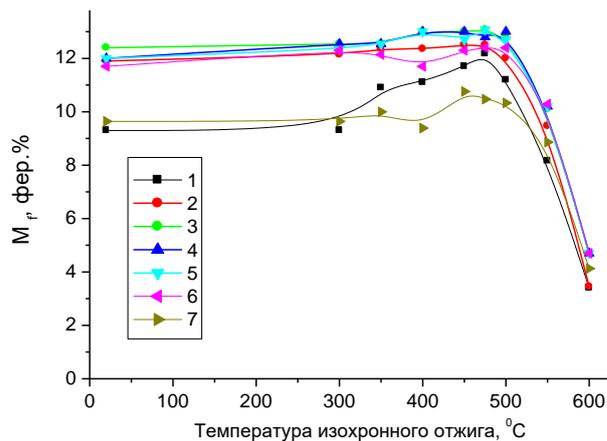
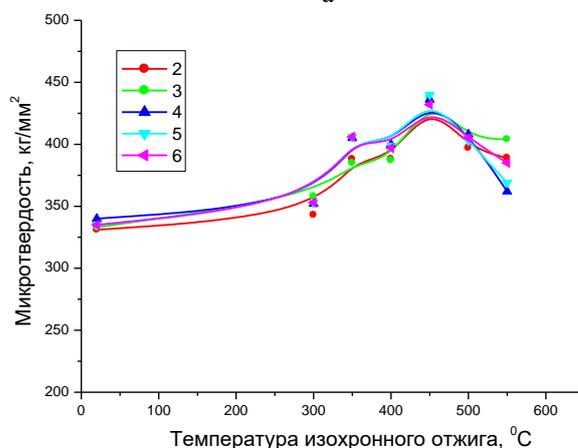


Рисунок 12. Кривые отжига ферромагнитной мартенситной  $\alpha'$ -фазы в деформированных образцах стали 12X18H9T ( $T_{исп.} = -100$  °С), имплантированных гелием (40 МэВ,  $10^{-3}$  ат%)

На графике можно условно выделить несколько температурных областей: 1)  $\leq 300$  °С, количество мартенсита практически не изменяется; 2) при 350-550 °С на ряде участков наблюдается прирост  $\alpha'$ -фазы и повышается  $H_{\mu}$ ; 4) при 550-800 °С имеет место интенсивное обратное мартенситное превращение  $\alpha' \rightarrow \gamma$  и наблюдается уменьшение характеристик  $M_f$  и  $H_{\mu}$ . Интенсификация обратного  $\alpha' \rightarrow \gamma$  превращения имеет место в температурном интервале 600-800 °С и протекает примерно одинаково для необлученных и облученных образцов хромоникелевых сталей. После отжига при 800 °С мартенситная фаза полностью отсутствует в микроструктуре.



а



б

Рисунок 13. Кривые изменения содержания мартенситной фазы (намагниченности) и микротвердости в разных точках на образце в зависимости от температуры отжига

В интервале температур отжига 400-550 °С обнаружен эффект совместного возрастания намагниченности и микротвердости отжигаемой стали, что обычно связывают с дополнительным образованием мартенситных включений вследствие релаксации напряжений сжатия в аустенитной матрице. Не исключено также, что при этих температурах в «старой» и «новой»  $\alpha'$ -фазах идут процессы старения, которые сопровождаются образованием зон Гинье-Престона (обогащенных хромом), что приводит к росту микротвердости. Формирующаяся в ходе релаксационного отжига  $\alpha'$ -фаза отличается большой дисперсностью и малой протяженностью кристаллитов (рисунок 14). Как правило, области релаксационного мартенсита возникают на стыке зон со «старой»  $\alpha'$ -фазой, где в ходе деформации нарастающие напряжения сжатия препятствуют дальнейшему  $\gamma \rightarrow \alpha'$  превращению.

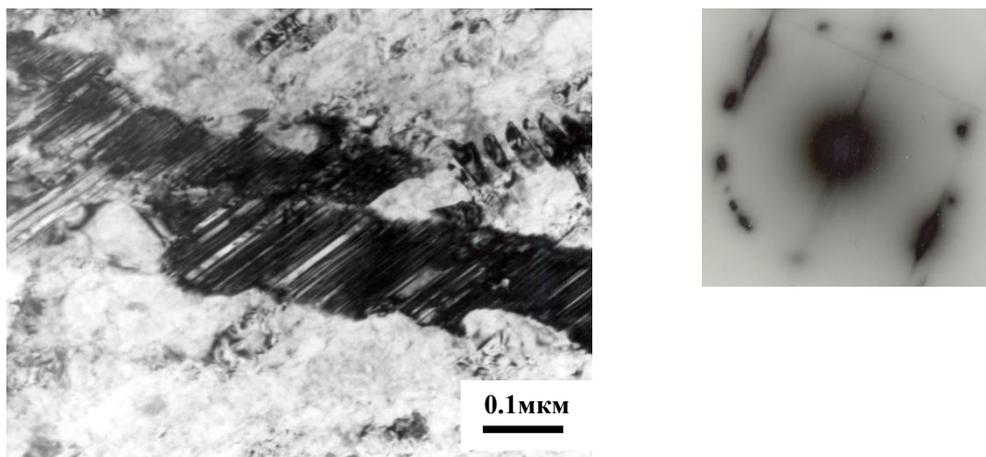


Рисунок 14. Мартенсит деформации в стали 12X18H10T, деформированной при  $-100^\circ C$  и отожженной при  $450^\circ C$  (30 мин)

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены особенности формирования мартенситной  $\alpha'$ -фазы в аустенитных хромоникелевых сталях, облученных высокоэнергетическими заряженными частицами (импульсными электронами, ионами гелия и криптона). Сочетание метода механических испытаний с измерениями намагниченности и микротвердости деформированных образцов, а также с возможностями электронной микроскопии (ПЭМ и РЭМ) позволили изучить различные аспекты протекания прямых (обратных) фазово-структурных  $\gamma \rightleftharpoons \alpha'$ -превращений и связанных с ними изменений физико-механических свойств аустенитных хромоникелевых сталей в условиях поверхностного/объемного облучения.

Показано, что предварительное облучение облегчает протекание прямого  $\gamma \rightarrow \alpha'$  превращения в деформированных аустенитных сталях и обуславливает более высокую интенсивность роста содержания мартенситной фазы в образце с увеличением степени деформации  $\epsilon$  по сравнению с необлученным материалом.

Несмотря на то, что механизм структурной перестройки решетки при  $\gamma \rightarrow \alpha'$  превращении в аустенитной стали одинаков для необлученной и облученной стали – это сдвиг по плотноупакованным плоскостям  $\{111\}$  с выполнением ориентационных соотношений Курдюмова-Закса, облучение заметно влияет на морфологии мартенсита. Для облученной

стали характерны более высокая плотность мартенситных зародышей и относительно небольшие размеры конечных выделений  $\alpha'$ -фазы. Наиболее вероятными местами зарождения  $\alpha'$ -фазы в облученной заряженными частицами аустенитной стали являются пересечения двойников и узлы ячеистой дислокационной структуры.

Экспериментально подтвержден факт образования мартенсита облучения в приповерхностных слоях образцов хромоникелевых сталей, непосредственно в результате облучения потоками ускоренных частиц (ИЭП и тяжелых ионов  $Kr^{+14}$ ). Количество образованной под облучением  $\alpha'$ -фазы напрямую зависит от энергии или мощности потока бомбардирующих частиц и флюенса облучения. С увеличением данных параметров количество  $\alpha'$ -фазы в образце возрастает.

На образцах хромоникелевой стали с гелием продемонстрирован эффект отжига при  $400-500^\circ C$ , связанный с образованием термически индуцированного мартенсита. Формирующаяся в ходе релаксационного отжига  $\alpha'$ -фаза отличается большой дисперсностью и малой протяженностью кристаллитов. Показано, что обратное  $\alpha' \rightarrow \gamma$  превращения при отжиге интенсифицируется в температурном интервале  $600-800^\circ C$  и протекает примерно одинаково для необлученных и облученных образцов хромоникелевых сталей. После отжига при  $800^\circ C$  мартенситная фаза полностью отсутствует в микроструктуре.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Петров, Ю.Н. Дефекты и бездиффузионное превращение в стали / Ю.Н. Петров // Киев: Наукова Думка. – 1972. – С.150.
2. Гойхенберг, Ю.Н.. Мартенситные превращения при пластической деформации и их влияние на механические свойства /Ю.Н. Гойхенберг и др.// Вопросы производства и обработки стали. – 1972. – №107.
3. Малышев, К.А. Фазовый наклеп аустенитных сплавов на железо-никелевой основе. / К.А. Малышев, В.В. Сагарадзе, И.П. Сорокин, Н.Д. Земцова и др.// М.: Наука. – 1982. – С. 260 .
4. Maksimkin, O.P. Deformation Induced Martensitic Transformation in Cr-Ni Stainless Steel Irradiated by Neutrons / O.P. Maksimkin // Physical status solidy (b). – 1997. – V.163. – P. R7-R8.

5. Максимкин, О.П. Влияние температуры деформации и отжига на мартенситное  $\gamma \rightarrow \alpha'$ -превращение и механические свойства стали 12X18H10T, облученной нейтронами / О.П. Максимкин, Д.Х. Садвакасов // Физика металлов и металловедение. – 1992. – №5. – С. 147-150.
6. Максимкин, О.П. Исследование мартенситного  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения в аустенитной нержавеющей хромоникелевой стали, имплантированной гелием / О.П. Максимкин, К.В. Цай, Н.В. Щербинина // Вопросы атомной науки и техники, сер.: Термоядерный синтез. – 2003. – №2. – С. 73-79.
7. Максимкин, О.П. Мартенситные превращения в нержавеющей аустенитной стали 12X18H9T, облученной альфа-частицами / О.П. Максимкин, И.Г. Осипов, Э.С. Айтхожин, и др. // Вестник НЯЦ РК. – 2006. – Вып. 4 (28). – С. 23-26.
8. Бердалиев, Д.Т. Исследование прямого мартенситного  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения, индуцированного деформацией в нержавеющей сталях 12X18H10T и 12X18H9T, облученных нейтронами и заряженными частицами. / Д.Т. Бердалиев // Диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н. Алматы., - 2010. – С.117.
9. Кислицын, С.Б. Блистеринг и  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращения при отжиге стали 12X18H10T, облученной низкоэнергетическими альфа-частицами. / С.Б. Кислицын, М.Ф. Верещак, И.А. Манакова и др. // Вопросы атомной науки и техники, сер. ФРП и РМ. – 2013. - №2 (84). – С.17-22.
10. Ibragimov, Sh.Sh. Study of plastic deformation and proto irradiation influence on phase transitions in G18N9T / Sh.Sh. Ibragimov, M.F. Vereshchak, T.M. Zhanikin // Hypertine Interactions. – 1986. - V.29. – P. 1293-1296.
11. Максимкин, О.П. О «мартенсите облучения» в реакторных нержавеющей сталях аустенитного класса / О.П. Максимкин // Вестник НЯЦ РК. – 2015. – Вып 1. – С. 17-26.
12. Рахашев, Б.К. Исследование обратного мартенситного  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращения в облученных высокоэнергетическими частицами деформированных нержавеющей сталях 12X18H10T и 08X16H11M3 / Б.К. Рахашев // Диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н. Алматы., - 2010, - С.116 .
13. Рубан, С.В. Аномальный эффект изменения магнитных и механических свойств облученной нейтронами нержавеющей стали 12X18H10T при отжиге 400°C. / С.В. Рубан, О.П. Максимкин, С.В.Рыбин // Вестник НЯЦ РК. – 2011. - №3. – С. 98-101.
14. Максимкин, О.П. Деформационная экстензометрия при механических испытаниях высокоактивных образцов металлов и сплавов. / О.П. Максимкин, М.Н. Гусев, И.Г. Осипов // Вестник НЯЦ РК. – 2005. – Вып. 1. – С. 46-52.
15. Максимкин, О.П. Электронно-микроскопическое изучение мартенситных превращений в облученной электронами стали 12X18H10T. / О.П. Максимкин, Х.Г. Кадыров, К.В. Цай, Н.В. Щербинина // Известия НАН РК, сер.: Физ.-мат. – 2003. – № 6. – С. 9-13.
16. Максимкин, О.П. Дефектная структура 12X18H10T, подвергнутой облучению импульсными электронными потоками и деформированию / О.П. Максимкин, Х.Г. Кадыров, К.В. Цай // Физика металлов и металловедение. – 2004. – Т.97, №4. - С. 42-48.
17. Кадыров, Х.Г. Влияние импульсных электронных пучков на физико-математические свойства металлов и сплавов / Х.Г. Кадыров, О.П. Максимкин // Сборник научных трудов «Методы экспериментальной физики». – Изд.-во Энергия РК. Алматы - 2010. – С.160.
18. Кадыров, Х.Г.  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение при деформации нержавеющей стали, подвергнутой воздействию импульсным электронным потоком / Х.Г. Кадыров, О.П. Максимкин, Д.Х. Садвакасов // Вестник КазНТУ. – 1995. - №2. – С. 72-73.
19. Иванов, Ю.Ф. Индуцированное импульсной электронной пучковой обработкой  $\gamma \rightarrow \epsilon$  мартенситное превращение / Ю.Ф. Иванов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2008. – Т.51, №11/2. – С. 141-144.
20. Зельдович, В.И. Исследование образования мартенсита в аустенитной стали при нарушении связи сферическ и сходящимся ударными волнами / В.И.Зельдович, А.Э. Хейфец, Н.Ю.Фролова и др. // Физика металлов и металловедение. – 2013. - Том 114, №2. – С. 1114-1120.
21. Русакова, А.В. EBSD – изучение мартенситного превращения в реакторной стали 12X18H10T, холоднодеформированной и облученной ионами криптона с энергией 1,56Мэв/нук / А.В. Русакова, О.П. Максимкин, Л.Н. Гусев // Вестник НЯЦ РК. – 2011. – Вып2. – С. 144-150.
22. Максимкин, О.П. Материаловедческие исследования структурно-градиентных материалов, созданных облучением заряженными частицами / О.П. Максимкин, А.В. Яровчук, К.В. Цай, Л.Г. Турубарова // Физика и химия обработки материалов. – 2007. - №2. – С. 5-11.
23. Olson, G.V. Kinetics of strain-induced martensitic nucleation / G.V. Olson, M. Cohen // Metallurgical transactions A. – 1975. – V. 6A. – P.791 – 795.
24. Максимкин, О.П. Влияние старения на мартенситное превращение при деформации стали 12X18H10T, облученной альфа-частицами / О.П. Максимкин, О.В. Таванова, К.В. Цай, Н.С. Сильнягина // ВАНТ сер. ФРП и РМ. – 2009. – Т. 93, №2. – С. 114-123.
25. Рахашев, Б.К. Исследование обратного мартенситного  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращения в облученных высокоэнергетическими частицами деформированных нержавеющей сталях / Рахашев Б.К. // Диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.-н, Алматы., - 2010. – С. 117.
26. Максимкин, О.П. Прямые и обратные мартенситные превращения в реакторных сталях, облученных нейтронами и заряженными частицами / О.П. Максимкин // Вестник НЯЦ РК. – 2015. – Вып.2. – С. 113-123.

**ҮДЕТІЛГЕН ЗАРЯДТАЛҒАН БӨЛШЕКТЕРДІҢ ( $e^-$ ,  $He^{+2}$ ,  $Kr^{+14}$ ) ТОТЫҢПАЙТЫН ХРОМНИКЕЛЬДІ 10-18 ТИПТІ БОЛАТТАРДАҒЫ ТУРА ЖӘНЕ КЕРІ МАРТЕНСИТТІ АЙНАУЛАРҒА ӘСЕРІ**

**О.П. Максимкин, К.В. Цай**

*ҚР Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан*

Жұмыста 18-10 типті аустенитті тотықпайтын хромникелді болаттардағы, электрондармен, жоғарғы энергиялы (50МэВ) альфа-бөлшектермен, үдетілген ауыр бөлшектермен сәулелендіргеннен кейінгі, тура  $\gamma \rightarrow \alpha$  және кері  $\alpha \rightarrow \gamma$  мартенситті айналулардың әсерінен болатын құрылымдары мен қасиеттерінің өзгерулерінің кешенді зерттеулер нәтижелері келтірілген.

**THE EFFECT OF ACCELERATED CHARGED PARTICLES ( $e^-$ ,  $He^{+2}$ ,  $Kr^{+14}$ ) ON DIRECT AND REVERCED MARTENSITIC TRANSFORMATIONS IN THE CR18NI10TI STAINLESS STEEL**

**O.P. Maksimkin, K.V. Tsay**

*Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan*

The research shows results of the complex studies on microstructural changes and properties of austenitic Cr-Ni steels as a result of direct  $\gamma \rightarrow \alpha$  and reversed  $\alpha \rightarrow \gamma$  martensitic transformations due to irradiation with impulse electrons, high-energy alpha-particles (50 MeV), accelerated heavy particles (Kr) as well as after deformation and annealing.

УДК 539.172.15.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНКЛЮЗИВНЫХ РЕАКЦИЙ НА ЯДРЕ  $^{59}\text{Co}$  ПОД ДЕЙСТВИЕМ УСКОРЕННЫХ ИОНОВ  $^3\text{He}$  С ЭНЕРГИЕЙ 50,5 МэВ С ВЫЛЕТОМ ПРОТОНОВ И ИОНОВ  $^3\text{He}$** 

<sup>1)</sup> Дуйсебаев А., <sup>1)</sup> Дуйсебаев Б.А., <sup>1)</sup> Жолдыбаев Т.К., <sup>1)</sup> Садыков Б.М.,  
<sup>2)</sup> Исмаилов К.М., <sup>1,3)</sup> Насурлла М., <sup>4)</sup> Казамбаева А.

<sup>1)</sup> *Институт ядерной физики МЭ РК, Алматы, Казахстан*

<sup>2)</sup> *Назарбаев Университет, Астана, Казахстан*

<sup>3)</sup> *КазНУ им. аль Фараби, Алматы, Казахстан*

<sup>4)</sup> *ЕНУ им. Н. Гумилева, Астана, Казахстан*

Получение новых экспериментальных данных по дважды дифференциальным и интегральным сечениям реакций из взаимодействия со стабильными изотопами гелия направлены на пополнение информационной базы ядерных констант и необходимы для проектирования систем безопасности энергетических реакторов, разработки перспективных ядерных технологий. В настоящей работе представлены экспериментальные дважды-дифференциальные и интегральные спектры реакций ( $^3\text{He}, \text{xp}$ ) и ( $^3\text{He}, \text{x}^3\text{He}$ ) на ядре  $^{59}\text{Co}$ , инициированные ионами  $^3\text{He}$  с энергией 50 МэВ. Выполнены теоретические расчеты экспериментальных инклюзивных спектров исследуемых реакций в рамках экситонной модели предравновесного распада ядер с установлением формирующих их механизмов. Полученные экспериментальные результаты восполняют отсутствующие величины сечений исследованных реакций и могут быть использованы при разработке новых подходов теории ядерных реакций, а также при конструировании безопасных и безотходных гибридных ядерно-энергетических установок.

**ВВЕДЕНИЕ**

Последние десятилетия в мире идет поиск альтернативных путей развития ядерной энергетики, позволяющих решить задачу повышения уровня безопасности и снижения количества отработавшего ядерного топлива. Исходя из данных требований, большое развитие получила идея создания гибридной установки (ADS, Accelerator-Driven System), которая наряду с получением энергии позволит трансмутировать долгоживущие радиоактивные продукты деления и минорные актиниды, переводя их в короткоживущее или стабильное состояние посредством ядерных реакций [1-3].

Ключевой проблемой на современном этапе является пополнение баз экспериментальных ядерных данных по сечениям взаимодействия нуклидов водорода и гелия с ядрами, которые входят в состав конструктивных элементов проектируемых установок [4, 5]. Такие данные также востребованы для тестирования теоретических моделей, созданных для описания перехода составной возбужденной системы в равновесное состояние.

Следует отметить, что изучены основные интегральные характеристики предравновесного распада в реакциях с нуклонами (см. обзор [6]), в то время как экспериментальная информация, связанная с измерением инклюзивных распределений вторичных легких заряженных частиц, инициированных нуклидами гелия и особенно  $^3\text{He}$ , ограничена [обзоры 7, 8].

**ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

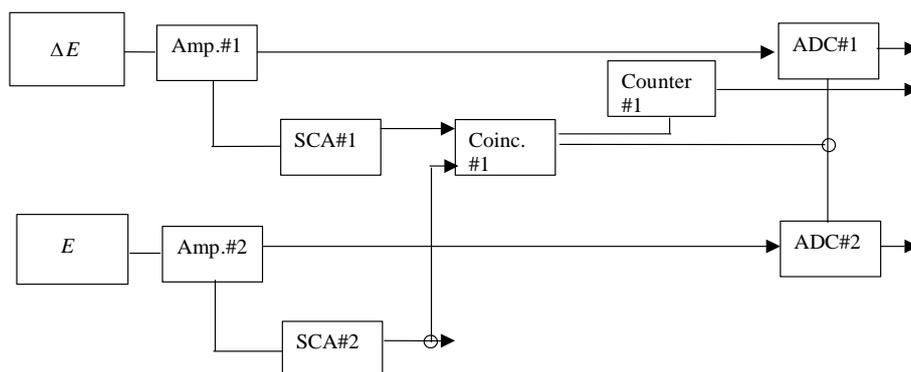
Экспериментальные данные получены на изохронном циклотроне У-150М Института ядерной

физики [9, 10] при энергии налетающих ионов  $^3\text{He}$  50,5 МэВ. В качестве мишени выбран  $^{59}\text{Co}$ , как конструкционный элемент проектируемых ядерно-энергетических установок [11]. Представленные в настоящей работе данные дополняют данные по сечениям образования дейтронов, тритонов и  $\alpha$ -частиц из работы [12]. Ранее в работе [13] на этом ядре были измерены энергетические спектры вторичных частиц ( $p$ ,  $d$ ,  $t$ ,  $\alpha$ ), образующихся при взаимодействии ионов  $^3\text{He}$  с ядром  $^{59}\text{Co}$  при энергии 34,8 МэВ.

Для идентификации продуктов реакций по массам и энергии принята ( $\Delta E - E$ ) методика, реализованная на базе системы регистрации и идентификации заряженных с использованием спектрометрических линеек на основе электроники фирм ORTEC и POLON, блок-схема которой представлена на рисунке 1.

Для измерения нами используется в качестве стопового детектор на основе сцинтиллятора CsI(Tl). В качестве пролетных детекторов установлены кремниевые детекторы толщиной 50 – 100 мкм. Подготовлена мишень  $^{59}\text{Co}$  с толщиной 2,3 мг/см<sup>2</sup> (моноизотоп).

Дважды-дифференциальные сечения реакции ( $^3\text{He}, \text{xp}$ ) и ( $^3\text{He}, \text{x}^3\text{He}$ ) на ядре  $^{59}\text{Co}$ , представлены на рисунках 2 – 3. Полная систематическая ошибка не превышала 10% и обусловлена, главным образом, погрешностями в определении толщины мишени (<7%) и телесного угла спектрометра (1,3%). Энергия пучка ускоренных частиц измерялась с точностью 1%. Статистическая ошибка, величина которой зависела от энергии регистрируемых частиц, изменялась от 3% до 15%.



Amp.#1,2 – спектроскопический усилитель; SCA#1,2 – одноканальный анализатор; Coinc.#1 – схема совпадений; Counter#1 – пересчетная схема; ADC#1,2 – амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП).

Рисунок 1. Блок-схема электроники  $\Delta E$ – $E$  методики

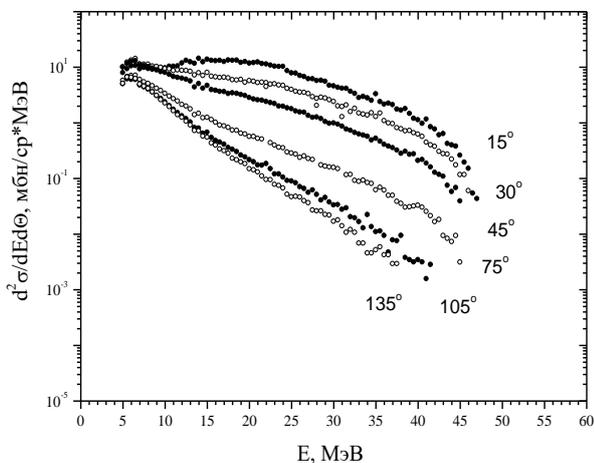


Рисунок 2. Дважды-дифференциальные сечения реакций  $^{59}\text{Co}(^3\text{He},\text{xp})$  при  $E(^3\text{He}) = 50,5$  МэВ при различных углах регистрации протонов

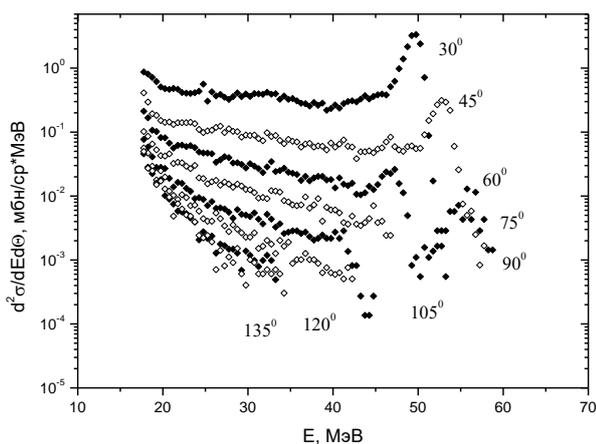


Рисунок 3. Дважды-дифференциальные сечения реакций  $^{59}\text{Co}(^3\text{He},x^3\text{He})$  при  $E(^3\text{He}) = 50,5$  МэВ при различных углах регистрации протонов

Из качественного рассмотрения полученных экспериментальных данных следует, что в случае вылета протонов величина сечения с ростом энергии вылетающих частиц значительно падает, в то время как для гелионов падение незначительно. В спектрах протонов, измеренных под углом  $15^\circ$ , наблюдается широкий бамп в сечениях, связанный с развалом  $^3\text{He}$  в поле ядра мишени на протон и дейтрон.

Экспериментальные данные по дважды-дифференциальным сечениям реакции  $(^3\text{He},\text{xp})$  и  $(^3\text{He},x^3\text{He})$  на ядре  $^{59}\text{Co}$  при энергии налетающих частиц 50,5 МэВ проинтегрированы в измеренном угловом диапазоне. Полученные интегральные сечения, усредненные в диапазоне энергий 0,5 МэВ, представлены на рисунках 4–5. Величины парциальных сечений соответствующих реакций представлены в таблице 1.

Таблица 1. Экспериментальные парциальные сечения реакций  $(^3\text{He},\text{xp})$  и  $(^3\text{He},x^3\text{He})$  на ядре  $^{59}\text{Co}$  при  $E_{\text{ЗHe}} = 50,5$  МэВ

Реакция	Энергетический диапазон, МэВ	Сечение, мбн
$^{59}\text{Co}(^3\text{He},\text{xp})$	6,0 – 45,5	$647,7 \pm 0,1$
$^{59}\text{Co}(^3\text{He},x^3\text{He})$	20,0 – 47,5	$12,1 \pm 0,1$

### АНАЛИЗ

Современная трактовка предравновесного механизма берет свое начало из экситонных моделей (ЭМ), первая из которых была предложена Гриффином [14]. С момента своего создания данная модель была существенно дополнена. Несмотря на все неоднозначности, экситонная модель остается одним из самых мощных инструментов в описании инклюзивных спектров.

В двухкомпонентной экситонной модели протонные и нейтронные степени свободы учитываются отдельно [15] и принимается, что ядро характеризуется параметрами  $p_\pi$ ,  $h_\pi$ ,  $p_\nu$  и  $h_\nu$ , где  $p$  и  $h$  обозначают частичные и дырочные, а  $\pi$  и  $\nu$  – протонные и ней-

тронные степени свободы, соответственно. Компонент ядро формируется с частично-дырочной конфигурацией, которая учитывает только налетающие нуклоны как частичные степени свободы и не учитывает дырочные. Такая конфигурация обозначается как  $(p_\pi, h_\pi, p_\nu, h_\nu) = (Z_a, 0, N_a, 0)$ , где  $a$  относится к бомбардирующей частице. Разность между числом частиц и дырок в процессе перехода в равновесное состояние сохраняется. Расчеты плотности одночастичных состояний рассчитываются отдельно для протонов  $g_{\pi 0}$  и нейтронов  $g_{\nu 0}$ :

$$g_{\pi 0} = \frac{Z}{K_g}, \quad (2)$$

$$g_{\nu 0} = \frac{N}{K_g}, \quad (3)$$

где  $K_g$  – нормировочный коэффициент. Плотность частично-дырочных состояний [16]:

$$\omega_{ESM}(p, p_\pi, E) = \frac{(g_{\pi 0})^{n_\pi} (g_{\nu 0})^{n_\nu} (E - A(p, p_\pi, E))^{n-1}}{p_\pi! h_\pi! p_\nu! h_\nu! (n-1)!}, \quad (4)$$

где  $A(p, p_\pi, E)$  – поправка, учитывающая выполнение принципа запрета Паули. Эти плотности используются для вычисления вероятностей переходов, которые переводят ядро из одной частично-дырочной конфигурации в другую.

В силу предположения о малости остаточных двухчастичных взаимодействий для нахождения отнесенной к единице времени вероятности внутриядерных переходов  $\lambda$  используется первый порядок теории возмущения [17]:

$$\lambda = (2\pi / \hbar) \langle |M|^2 \rangle \omega, \quad (5)$$

где  $|M|^2$  – среднеквадратичный матричный элемент, определяющий интенсивность внутриядерных переходов, то есть переходов между состояниями с различным  $n$ , а  $\omega$  – плотность конечных состояний, реально достижимых при данном переходе. Предполагается, что матричные элементы имеют одинаковую формулу и отличаются только нормализующими коэффициентами  $K_{ij}$  [15]:

$$|M_{ij}|^2 = K_{ij} A_a g_0^{-3} \left( \frac{E}{3A_a} + 20.9 \right)^{-3}, \quad (6)$$

где  $A_a$  – масса налетающей частицы.

На любом этапе релаксации системы возможна эмиссия частиц типа  $b$  в канал с энергией  $\varepsilon$ . Скорость испускания частицы из этого состояния рассчитывается по формуле:

$$W_b(p, p_\pi, E, \varepsilon) = \frac{2s_b + 1}{\pi^2 \hbar^3} \mu_b \varepsilon \sigma_b(\varepsilon) \times \frac{\omega(p_\pi - Z_b, h_\pi, p_\nu - N_b, h_\nu, U)}{\omega(p_\pi, h_\pi, p_\nu, h_\nu, E)}, \quad (7)$$

где  $Z_b$  и  $N_b$  – число протонов и нейтронов вылетевшей частицы,  $s_b$  – ее спин, а  $\mu_b$  – ее масса. Величина  $\sigma_b(\varepsilon)$  – сечение инверсного процесса образования составного ядра,  $U$  – энергия возбуждения, определяемая как  $U = E - \varepsilon - B_b$ , где  $B_b$  – энергия связи испускаемой частицы.

Теоретические расчеты проведены в рамках компьютерного кода PRECO-2006 [18], оптимизированного для рассматриваемого случая. Использовалась начальная  $(p_\pi, h_\pi, p_\nu, h_\nu) = (2, 0, 1, 0)$  частично-дырочная конфигурация. Нормировочный коэффициент  $K_g$  принимался равным 15 МэВ. Параметризация квадратов матричных элементов проводилась с использованием нормировочных констант:  $K_{\pi\pi}$ :  $K_{\pi\nu}$ :  $K_{\nu\nu} = 2200:900:900$  МэВ<sup>2</sup>.

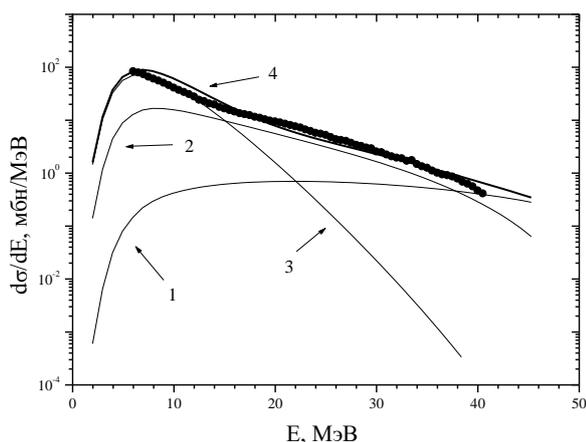
Для полного описания эмиссии частиц в ядерных реакциях, в дополнение к вычислениям в рамках экситонной модели, были проведены расчеты в рамках других механизмов. При вычислении равновесного сечения использовался формализм распада составного ядра Вайскопфа. Определены вклады прямых процессов (передача – выбивание нуклонов, неупругое рассеяние).

На рисунках 4 – 5 совместно с экспериментальными результатами представлены рассчитанные вклады механизмов, формирующих инклюзивные сечения реакций ( $^3\text{He}, xp$ ) и ( $^3\text{He}, x^3\text{He}$ ) на ядре  $^{59}\text{Co}$  при энергии налетающих частиц 50,5 МэВ. В таблице 2 приведены численные значения вкладов различных механизмов ядерных реакций в формирование интегральных спектров.

Из рассмотрения механизмов, формирующих инклюзивные сечения реакций ( $^3\text{He}, xp$ ) на ядрах  $^{59}\text{Co}$  следует, что образование протонов происходит преимущественно через равновесное излучение. С энергией выше 15 МэВ преобладающим процессом становится вылет предравновесных протонов. За высокоэнергетическую часть спектра (более 40 МэВ) ответственны одноступенчатые прямые механизмы.

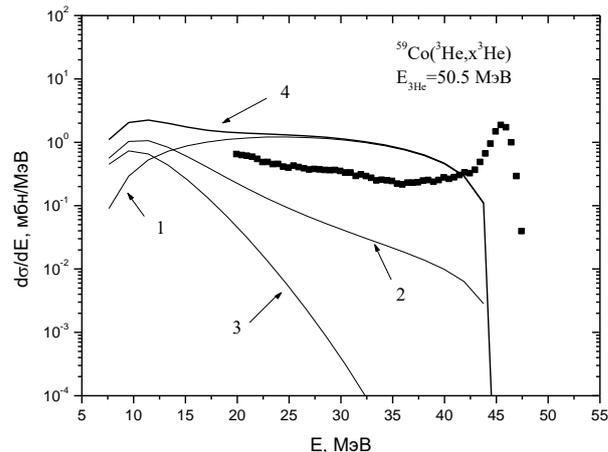
Из рассмотрения экспериментальных и теоретически рассчитанных интегральных сечений реакций ( $^3\text{He}, x^3\text{He}$ ) на ядре  $^{59}\text{Co}$  следует, что образование гелионов в диапазоне энергий выше 15 МэВ идет преимущественно через одноступенчатые прямые механизмы. Низкоэнергетическая часть спектра формируется двумя конкурирующими процессами – предравновесным и составным.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНКЛЮЗИВНЫХ РЕАКЦИЙ НА ЯДРЕ  $^{59}\text{Co}$  ПОД ДЕЙСТВИЕМ УСКОРЕННЫХ ИОНОВ  $^3\text{He}$  С ЭНЕРГИЕЙ 50,5 МэВ С ВЫЛЕТОМ ПРОТОНОВ И ИОНОВ  $^3\text{He}$**



Символы – эксперимент, 1 – одноступенчатые процессы, 2 – предравновесная компонента, 3 – равновесная эмиссия, 4 – суммарное интегральное сечение.

*Рисунок 4. Сравнение экспериментальных интегральных сечений реакций  $^{59}\text{Co}(^3\text{He}, xp)$  с расчетами в рамках экситонной модели*



Символы – эксперимент, 1 – одноступенчатые процессы, 2 – предравновесная компонента, 3 – равновесная эмиссия, 4 – суммарное интегральное сечение.

*Рисунок 5. Сравнение экспериментальных интегральных сечений реакций  $^{59}\text{Co}(^3\text{He}, x^3\text{He})$  с расчетами в рамках экситонной модели*

*Таблица 2. Вклады различных механизмов ядерных реакций в формирование интегральных спектров ( $^3\text{He}, xp$ ) и ( $^3\text{He}, x^3\text{He}$ ) на ядре  $^{59}\text{Co}$  при  $E_{^3\text{He}} = 50,5$  МэВ*

Реакция	Ссылка	Энергетический диапазон, МэВ	Механизмы ядерных реакций			
			прямой, мбн	предравновесный, мбн	равновесный, мбн	сумма, мбн
$^{59}\text{Co}(^3\text{He}, xp)$	настоящая работа	3 – 40	12,1 (9,7%)	47,8 (38,5%)	64,4 (51,8%)	124,3 (100%)
$^{59}\text{Co}(^3\text{He}, x^3\text{He})$	настоящая работа	2 – 36	14,3 (44,5%)	10,9 (34%)	6,9 (21,5%)	32,1 (100%)
$^{59}\text{Co}(^3\text{He}, xd)$	[12]	4 – 49	30,7 (20,6%)	66,3 (44,5%)	52,0 (31%)	149,0 (100%)
$^{59}\text{Co}(^3\text{He}, xt)$	[12]	4 – 44	25,5 (55,8%)	8,6 (18,8%)	11,6 (25,4%)	45,7 (100%)
$^{59}\text{Co}(^3\text{He}, x\alpha)$	[12]	6 – 54	22,0 (6,9%)	108,0 (33,6%)	191,0 (59,5%)	321,0 (100%)

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены экспериментальные данные по дважды-дифференциальным и интегральным сечениям реакций ( $^3\text{He}, xp$ ) и ( $^3\text{He}, x^3\text{He}$ ) на ядре  $^{59}\text{Co}$  при энергии. При анализе полученных дважды-дифференциальных и интегральных сечений реакций в рамках действующих теоретических подходов, установлено, что сечения в реакции ( $^3\text{He}, xp$ ) преимущественно формируются механизмами предравновесного распада и распада из составного ядра. В реакции ( $^3\text{He}, x^3\text{He}$ ) значительный вклад в инклюзивные сечения вносят одноступенчатые прямые механизмы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Риволь Ж.-П. Электроядерная установка для уничтожения ядерных отходов // УФН. – 2003. – Т. 173, Вып. 7. – С. 747-755.
2. Бззуни С.А., Барашенков В.С., Жамкочан В.М., Соснин А.Н., Полянски А., Худавердян А.Г. Перспективные электроядерные системы // ЭЧАЯ. – 2003. – Т. 34, Вып. 4. – С. 976-1032.
3. it Abderrahim H.A, Kupschus P., Malambu E., Benoit Ph., Van Tichelen K., Arien B., Vermeersch B., D'hondt P., Jongen Y., Temier S., Vandeplasse D. MYRRHA: A multipurpose accelerator driven system for research & development // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A. – 2001. – Vol. 463. – P. 487-494.

Экспериментальные результаты восполняют отсутствующие величины сечений исследованных реакций и могут быть использованы при разработке новых подходов теории ядерных реакций, а также при конструировании безопасных и безотходных гибридных ядерно-энергетических установок, расчетах распределений первично выбитых атомов в радиационном материаловедении.

*Работа выполнена при поддержке программы Грантового финансирования научных исследований МОН РК, грант 0335/ГФ4.*

4. Герасимов А.С., Киселев Г.В. Научно-технические проблемы создания электроядерных установок для трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов и одновременного производства энергии (российский опыт) // ЭЧАЯ – 2001. – Т. 32, Вып. 1. – С. 143-188.
5. Игнатюк А.В., Николаев М.Н., Фурсов В.И. Развитие банка оцененных ядерных данных для современных технологий // Атомная энергия. – 2014. – Т. 116. – С. 209-216.
6. Koning A.J., Duijvestijn M.C. A global pre-equilibrium analysis from 7 to 200 MeV based on the optical model potential // Nucl. Phys. A. – 2004. – Vol. 744. – P. 15-76.
7. Kalbach C. Pre-equilibrium reactions with complex particle channels // Phys. Rev. C. – 2005. – Vol. 71. – P.034606-1 – 034606-23.
8. Hodgson P.E., Betac E. Cluster emission, transfer and capture in nuclear reactions // Phys. Rep. – 2003. – Vol. 374. – P. 1-89.
9. Арзуманов А.А., Неменов Л.М., Анисимов О.И. и др. Изохронный циклотрон с регулируемой энергией ионов // Изв. АН КазССР, сер. физ. – мат. – 1973. – № 4. – С. 6-15.
10. Дуйсебаев А.Д., Иванов Г.Н., Рыбин С.Н. Камера рассеяния для исследования продуктов ядерных реакций на пучке циклотрона // Изв.АН КазССР, сер. физ. – мат. – 1983. – № 2. – С. 80-81.
11. Ikeda Y. Nuclear Data Relevant to Accelerator Driven System // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2002. – Suppl. 2. – P. 13-18.
12. Дуйсебаев А., Дуйсебаев Б.А., Жолдыбаев Т.К., Садыков Б.М., Исмаилов К.М., Мереке А. Дважды-дифференциальные и интегральные сечения реакций  $(^3\text{He},xd)$ ,  $(^3\text{He},xt)$  и  $(^3\text{He},x\alpha)$  на ядре  $^{59}\text{Co}$  при энергии  $^3\text{He}$  50,5 МэВ // Вестник НИЯЦ РК. – 2013. – Вып. 1. – С. 18-23.
13. Дуйсебаев А.Д., Буртебаев Н., Иванов Г.Н., Канашевич В.И., Кэбин Э.И., Личман В.А., Нечаев Ю.И., Хаймин В.А., Сухаревский В.Г. Исследование реакций на ядрах  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{59}\text{Co}$ ,  $^{112}\text{Sn}$  под действием ускоренных ионов  $^3\text{He}$  с энергией 34,8 МэВ с вылетом протонов, дейтронов, тритонов и  $\alpha$ -частиц // Ядерная физика. – 1982. – Т. 26, Вып.1 (17). – С. 32.
14. Griffin J.J. Statistical model of intermediate structure // Phys. Rev. Lett. – 1966. – Vol. 17, № 9. – P. 478-481.
15. Kalbach C. Two-component exciton model: Basic formalism away from shell closures // Phys. Rev. C. – 1986. – Vol. 33. – P. 818-833.
16. Williams F. C. Particle-hole state density in the uniform spacing model // Nucl. Phys. A. – 1971. – Vol. 166. – P. 231-240.
17. Williams F. C. Intermediate state transition rates in the Griffin model // Phys. Lett. B. – 1970. – Vol. 31. – P. 184-186.
18. Kalbach C. PRECO-2006: Exciton model preequilibrium nuclear reaction code with direct reaction. – Durham NC 27708-0308, 2007. – 184 p.

**$^3\text{He}$  ПРОТОНДАРЫ МЕН ИОНДАРЫНЫҢ ҰШЫП ШЫҒУЫМЕН 50,5 МэВ ЭНЕРГИЯЛЫ  
 $^3\text{He}$  ҮДЕТІЛГЕН ИОНДАРЫНЫҢ ӘСЕРІМЕН  $^{59}\text{Co}$  ЯДРОСЫНДА ИНКЛЮЗИВТІК  
РЕАКЦИЯЛАРДЫ ЗЕРТТЕУ**

<sup>1)</sup> Ә. Дүйсебаев, <sup>1)</sup> Б.Ә. Дүйсебаев, <sup>1)</sup> Т.К. Жолдыбаев, <sup>1)</sup> Б.М. Садыков,  
<sup>2)</sup> К.М. Исмаилов, <sup>1,3)</sup> М. Насурлла, <sup>4)</sup> А. Казамбаева

<sup>1)</sup> Ядролық физика институты ЭМ ҚР, Алматы, Қазақстан

<sup>2)</sup> Назарбаев Университеті, Астана, Қазақстан

<sup>3)</sup> Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан

<sup>4)</sup> Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан

Гелийдің тұрақты изотоптарымен өзара әрекеттесуден шыққан екі мәрте дифференциалдық және интегралдық қималары бойынша жаңа эксперименттік деректерді алу ядролық тұрақтылардың ақпараттық базасын толықтыруға бағытталған және энергетикалық реакторлардың қауіпсіздік жүйелерін жобалауға, перспективалы ядролық технологияларды әзірлеуге қажет. Осы жұмыста 50 МэВ энергиялы  $^3\text{He}$  иондарымен түрткіленген  $^{59}\text{Co}$  ядросында  $(^3\text{He},xp)$  және  $(^3\text{He},x^3\text{He})$  реакциялардың эксперименттік екі мәрте-дифференциалдық және интегралдық спектрлері ұсынылған. Ядролардың тепе-теңдік алды ыдырауының экситондық моделі шеңберінде олардың механизмдерін қалыптастыратын орнатумен зерттелетін реакциялардың эксперименттік инклюзивтік спектрлердің теориялық есептері орындалды. Алынған эксперименттік нәтижелер зерттелген реакциялар қималарының жоқ қималарын толықтырады және ядролық реакциялар теориясының жаңа тәсілдемесін әзірлегенде, сондай-ақ қауіпсіз және қалдықсыз гибридік ядро-энергетикалық қондырғыларды құрастыру кезінде пайдалануы мүмкін.

**STUDY ON INCLUSIVE REACTIONS OF INTERACTION OF 50.5 MeV  $^3\text{He}$  IONS  
ON  $^{59}\text{Co}$  NUCLEUS WITH THE EMISSION OF PROTONS AND  $^3\text{He}$  IONS**

<sup>1)</sup> A. Duisebaev, <sup>1)</sup> B. Duisebaev, <sup>1)</sup> T.K. Zholdybayev, <sup>1)</sup> B.M. Sadykov,  
<sup>2)</sup> K.M. Ismailov, <sup>1,3)</sup> M. Nassurlla, <sup>4)</sup> A. Kazambayeva

<sup>1)</sup> *Institute of Nuclear Physics ME RK, Almaty, Kazakhstan*

<sup>2)</sup> *Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan*

<sup>3)</sup> *Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

<sup>4)</sup> *L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

The measurements of new experimental data on double differential and integral cross sections of the reactions with helium stable isotopes are aimed at updating the information base of nuclear constants and needed for the designing of safety systems of power reactors and for the development of advanced nuclear technologies. This paper presents the experimental double differential and integral spectra of reactions ( $^3\text{He},xp$ ) and ( $^3\text{He},x^3\text{He}$ ) on  $^{59}\text{Co}$  nucleus initiated by  $^3\text{He}$  ions with an energy of 50 MeV. Theoretical calculations of the experimental inclusive spectra of the reactions within the exciton model of pre-equilibrium decay of nuclei with the identification of their forming mechanisms. The experimental results supply the missing values of cross sections of the investigated reactions and could be used in development of new approaches of the theory of nuclear reactions, as well as in the designing of safe and wasteless hybrid nuclear power plants.

УДК 621.039.9

## СИСТЕМА ТРЕНИНГА ЭКСПЕРТОВ ПО ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕИЗВЕСТНЫХ ТОПЛИВНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРОВ, КАК ИНСТРУМЕНТ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ НЕЗАКОННОМУ ОБОРОТУ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

<sup>1)</sup> Горин Н.В., <sup>1)</sup> Волошин Н.П., <sup>1)</sup> Корнеев А.А., <sup>1)</sup> Липилина Е.Н., <sup>1)</sup> Стародумова И.Г.,  
<sup>1)</sup> Простаков В.И., <sup>1)</sup> Чуриков Ю.И., <sup>1)</sup> Шмаков Д.В., <sup>2)</sup> Скаков М.К., <sup>2)</sup> Чернядьев В.В.

<sup>1)</sup> *Российский Федеральный ядерный центр Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия*  
<sup>2)</sup> *Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

Предложено создать инструмент противодействия незаконному обороту ядерных материалов для правоохранительных органов и международных организаций в виде системы обучения экспертов способам идентификации неизвестных деталей, в отношении которых имеются подозрения, что они являются топливными деталями активных зон исследовательских реакторов и, следовательно, могут содержать ядерный материал высокого обогащения. В основу системы должна быть заложена база данных по характеристикам всех исследовательских реакторов в мире, в том числе по характеристикам их топливных деталей, и в этом случае, по результатам измерений размеров неизвестной детали, плотности ядерного материала, обогащения, элементного состава можно будет идентифицировать реактор, которому может принадлежать деталь. Сформулированы требования к компьютеру для установки базы данных и показано, что вполне достаточно современной существующей офисной техники. Показан алгоритм действий эксперта при идентификации неизвестной детали.

**Ключевые слова:** противодействие незаконному обороту ядерных материалов, тренинг, идентификация.

### ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с международными соглашениями в отношении всех радиоактивных материалов, широко используемых во многих отраслях промышленности, должны применяться строгие регулирующие, административные и инженерно-технические меры, направленные на повышение безопасности и сохранности. При этом для ядерных материалов предъявляются дополнительные требования, прежде всего в области физической защиты и учета, обеспечивающие гарантии от угроз ядерного распространения и любых попыток переключения. Анализ событий, происходящих во многих районах мира, по-прежнему выявляет факты перемещения радиоактивных материалов вне регулирующих и законных структур. В целях проверки законности таких перемещений и предотвращения переключения и незаконного оборота радиоактивные материалы и экспорт элементов ядерных технологий требуют дополнительного внимания со стороны правоохранительных и регулирующих учреждений.

Наиболее действенным механизмом предотвращения незаконного оборота ядерных материалов является их учёт, контроль и физическая защита, но поскольку идеальных систем защиты не существует, то хищение ядерного материала возможно, и злоумышленников может привлекать, прежде всего, топливо исследовательских реакторов, так как оно изготовлено из высокообогащённого урана. Согласно базе данных МАГАТЭ в мире насчитывается около 700 исследовательских ядерных установок – действующих, остановленных, выведенных из эксплуатации, строящихся и запланированных к сооружению,

примерно половина из них находятся в США и в России.

При задержании неизвестного ядерного материала для пресечения дальнейших противоправных действий необходима его идентификация с целью определения мест производства, эксплуатации и хищения. Для помощи экспертам при идентификации было предложено [1-3] создать базу данных по характеристикам всех исследовательских реакторов в мире, как бывших, так и действующих, с помощью которой возможно идентифицировать и неизвестное топливо, и неизвестные твэлы и ТВС активных зон. Существующая база данных МАГАТЭ по исследовательским реакторам [4] не содержит данных по конструкции топливных деталей и для идентификации не может быть использована. Для тренировки экспертов предложено дополнить базу макетами деталей и на них отрабатывать процесс идентификации.

### СИСТЕМА ПОДГОТОВКИ ЭКСПЕРТОВ

В [1] показан алгоритм использования базы данных в интересах противодействия незаконному обороту, но для его реализации необходим квалифицированный персонал и в рамках настоящей работы предложена система тренинга для его подготовки со следующим сценарием: В распоряжение эксперта правоохранительных органов поступила неизвестная деталь или её фрагмент с подозрениями, что это может быть топливная деталь исследовательского реактора и, следовательно, может содержать ядерный материал высокого обогащения. Требуется либо опровергнуть подозрения, либо подтвердить и назвать этот реактор. Как только идентифицирован реактор, становятся понятными дальнейшие шаги по

противодействию незаконному обороту. Роль эксперта выполняет специалист, обучающийся работе по предлагаемой системе.

К настоящему времени все составные части системы созданы и отработаны. Основным элементом – база данных, содержащая информацию об исследовательских реакторах, в том числе 3D-моделей топливных деталей, для эффективного сравнительного анализа. Сравнение проводится по форме, размерам, особенностям конструкции, по типу ядерного материала, элементному составу, плотности, обогащению, по легирующим добавкам и примесям. Совпадение по всем перечисленным критериям означает, что неизвестная деталь является ТВЭЛом/ТВС конкретного исследовательского реактора, что делает возможным определение места его изготовления и эксплуатации.

Система подготовки включает использование инертных макетов топливных деталей исследовательских реакторов и фрагментов деталей с повреждениями. Макеты изготавливаются в натуральную величину с имитацией всех особенностей конструкции и свойств материала. Качество имитации позволит эксперту отрабатывать навыки анализа размеров детали, плотности материала, а так же, исследования элементного и изотопного состава и примесей.

Программное обеспечение предлагаемой системы состоит из:

- Базы данных, содержащей исчерпывающую информацию об исследовательских реакторах СССР/РФ и США и их топливных деталях.

- Программы расчёта достоверности (вероятности) идентификации в зависимости от погрешностей измерений размеров, плотности, элементного и изотопного состава и примесей. Достоверность идентификации будет уменьшаться по мере роста среднеквадратичных отклонений параметров идентифицируемой детали или её фрагмента от соответствующих величин, хранящихся в базе данных. По итогам опытной эксплуатации системы будет предложен вероятностный критерий определения границы достоверности.

- Графического 3D-редактора для работы с трёхмерными моделями, позволяющего проводить сравнительный анализ 3D-модели неизвестной детали, полученной в результате сканирования, с базовой 3D-моделью предполагаемого исследовательского реактора.

- Графического редактора для работы с растровыми изображениями, позволяющего проводить сравнительный анализ изображения неизвестной детали с изображением базовой 3D-модели предполагаемого исследовательского реактора.

В составе инструментария системы тренинга должны быть:

- Трёхмерный лазерный сканер для оцифровки поверхностей фрагментов деталей и построения их трёхмерных моделей.

- Электронные весы.
- Гамма-спектрометр с кристаллом NaI (100×100).

- Аппаратура для элементного и изотопного анализа.

- Набор  $\gamma$ -источников малой активности и больших деталей из урана разного обогащения.

- Набор мерительного инструмента.

#### **ОБОЛОЧКА БАЗЫ ДАННЫХ**

Оболочка такой базы данных создана (2012 г.) и база частично наполнена информацией по советским/российским и американским исследовательским реакторам. Её программное обеспечение разработано в среде Microsoft Access 2010, все инструкции и руководства – с использованием текстового редактора Microsoft Word 2010, все загруженные презентации выполнены в среде Microsoft PowerPoint 2010. На персональном компьютере установлена операционная система Windows XP, офисный пакет Microsoft Office 2010, программное обеспечение сканирования и распознавания графической информации, антивирусные программы. Требования к персональному компьютеру – процессор Pentium IV, оперативная память 1 Гбайт, съёмный жёсткий магнитный диск ёмкостью не менее 250 Гбайт, привод DVD-RW, монитор с экраном не менее 22 дюймов. Пользователь базы данных оперирует с информацией посредством графического интерфейса в виде форм Microsoft Access 2010. Разработанное программное обеспечение относительно просто может быть переведено на более современные программы, в том числе отечественные. В настоящее время продолжается набор открытой информации в библиотечных фондах по исследовательским реакторам СССР/РФ и США и их топливным деталям.

#### **ОСНОВНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ**

При идентификации действия эксперта должны быть основаны на том, что исходные детали были изготовлены на металлообрабатывающих станках и содержали плоские, цилиндрические, конические или сферические поверхности. На первом этапе идентификации эксперту следует определить их геометрические характеристики – радиусы цилиндрических или сферических поверхностей, линейные размеры параллелепипеда или пластины, длины стержней и пр. – и ввести запрос в базу данных, т.е. попытаться идентифицировать деталь самым простым способом по форме и геометрическим размерам. Качество обработки поверхностей при изготовлении было высоким, но в процессе противоположных действий и незаконного оборота они могли получить повреждения, в связи с чем результаты измерений геометрических размеров, скорее всего, будут отличаться от исходных, в том числе из-за погрешностей при измерениях с малыми фрагментами, но сам топливный материал, его плотность, элементный и изотопный состав останутся неизменными.

### ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ МЕТОДА

Для проверки функционирования системы и оценки возможных погрешностей измерений был отлит макет топливной детали гипотетического исследовательского реактора, похожий на диск одного из импульсных реакторов РФЯЦ-ВНИИТФ. Размеры отливки толщина 19 мм, наружный диаметр 234 мм, центральное отверстие диаметром 134 мм и три одинаковых отверстия диаметром 20 мм, симметрично расположенных под углом 120° друг относительно друга на диаметре 200 мм. Отливка из хрупкого материала на основе цемента была разбита на восемь фрагментов, как представлено на рисунке 1, и на них отрабатывался процесс идентификации. Выбранный материал отливки моделировал неоднородности поверхностей, возникших якобы в процессе незаконного оборота.



Рисунок 1. Макет топливной детали гипотетического исследовательского реактора, разбитый на фрагменты

На рисунке 2 представлены результаты оценки погрешностей при измерениях радиусов внутренних и внешних цилиндрических поверхностей, свидетельствующие о возрастании погрешностей по мере уменьшения линейных размеров фрагментов.

Метод восстановления формы исходной детали по форме одного из фрагментов состоит в предположительном дополнении его до целой детали на основе анализа внешнего вида, и сравнения с чертежами и трёхмерными моделями, хранящимися в базе данных.

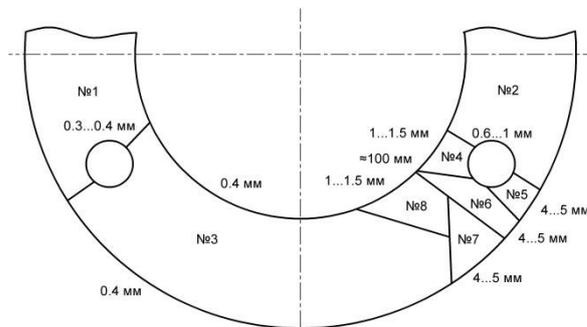


Рисунок 2. Погрешности измерений радиусов цилиндрических поверхностей у фрагментов детали

Например, при анализе фрагмента №6, содержащего элементы трёх цилиндрических поверхностей, эксперт может допустить, что исходная деталь была в виде кольца, фрагмент располагался между центральным отверстием и краем, а кольцо имело, по крайней мере, одно периферическое отверстие, но исходя из соображений симметрии, эксперт может допустить и большее число отверстий. Отметим, что измерение, а скорее оценка, радиуса внутренней цилиндрической поверхности для этого фрагмента выполнено с очень большой погрешностью.

Эксперту следует учитывать, что каждый из фрагментов содержит информацию о толщине пластины или кольца, ему надо будет проверить плоскостность поверхностей и обратить внимание на фаски у цилиндрических поверхностей фрагментов. Рисунок 3 иллюстрирует простейший способ идентификации плоской поверхности одного из фрагментов. На фотографии видны неоднородности поверхностей, фаски повреждены или отсутствуют.

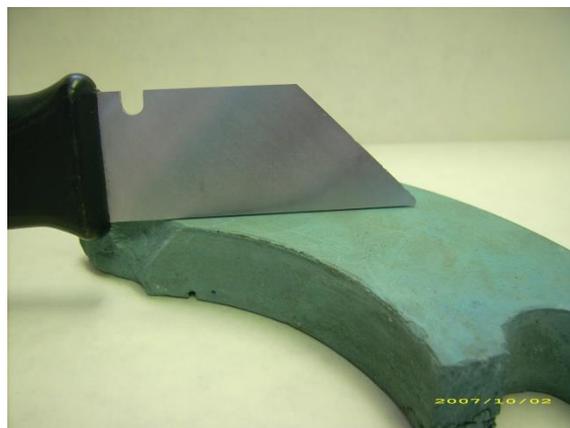


Рисунок 3. Способ идентификации плоской поверхности одного из фрагментов

Все фрагменты в той или иной степени информативны, но по мере уменьшения их размеров информативность снижается, и прогноз формы исходной детали становятся менее определёнными.

Если неизвестная деталь действительно является твэлом или ТВС исследовательского реактора, то этот реактор будет обнаружен, возможно, в числе нескольких других, имеющих одинаковые параметры твэлов и ТВС. С помощью трехмерной модели детали, имеющейся в базе, эксперт сможет убедиться в надёжности идентификации (рисунок 4) и определить предположительные формы других, отсутствующих фрагментов разрушенной детали.

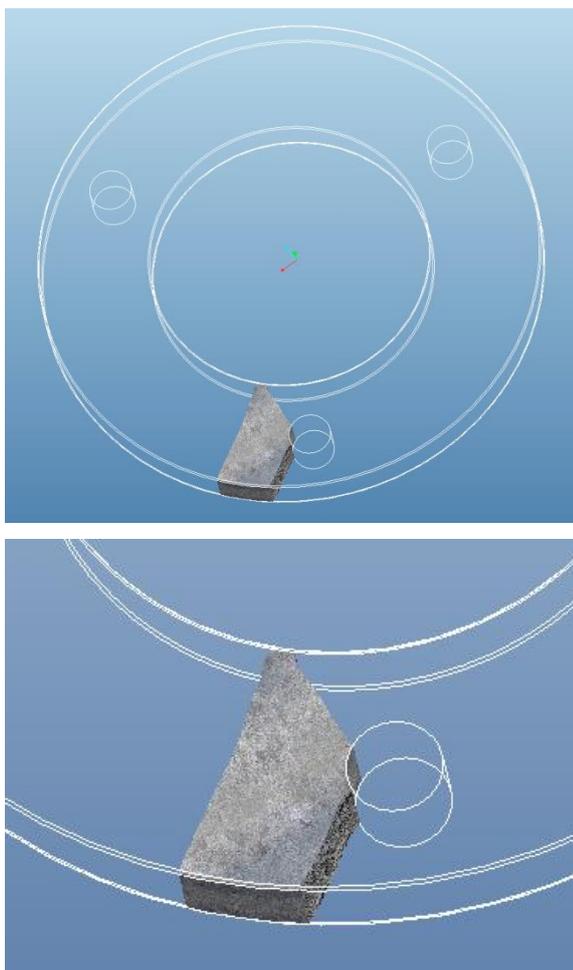


Рисунок 4. Трёхмерное изображение детали гипотетического реактора со вписанным фрагментом №6

В случае, когда в распоряжении эксперта имеется только подобное растровое изображение неизвестной детали (фотография), восстановление ее формы так же возможно путем предположительного дополнения фрагмента до целой детали, на основе анализа внешнего вида, и сравнения с изображением трёхмерной модели предполагаемого исследовательского реактора, хранящейся в базе данных.

Так, на рисунке 5 представлена фотография целого топливного блока ИГР, а на рисунке 6 – резуль-

тат восстановления формы реальной топливной детали исследовательского реактора, при котором поврежденный фрагмент [5] был «достроен» до целой детали, и продемонстрировано совпадение изображения «достроенной» детали с изображением 3D-модели реального блока ИГР.



Рисунок 5. Топливный блок ИГР

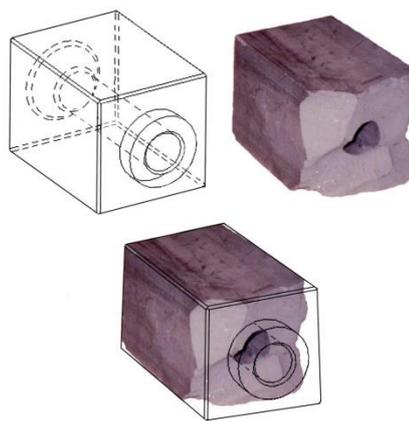


Рисунок 6. Изображение фрагмента блока ИГР, вписанное в контур целого блока. При фотографировании с близкого расстояния происходит небольшое искажение углов и пропорций, что видно на рисунке

Процедура сравнения изображения фрагмента детали с изображением 3D-модели реальной детали реактора выполнена в следующей последовательности:

- по результатам визуального анализа изображенного на фото фрагмента высказано предположение о его принадлежности конкретной детали реактора;
- в САПР создана 3D-модель предполагаемой реальной детали реактора и подобран ракурс для ее изображения, соответствующий ракурсу имеющегося изображения фрагмента (в данном случае использован программный комплекс Pro/ENGINEER);
- создано растровое изображение каркаса детали в ракурсе, соответствующем изображению фрагмента на фото;

– в графическом редакторе растровое изображение 3D-модели детали смасштабировано до размеров изображения фрагмента и путем совмещения ребер модели с сохранившимися ребрами фрагмента, изображение каркаса детали наложено на изображение фрагмента (для данной цели использован многофункциональный графический редактор Adobe Photoshop);

– по результату наложения сделан вывод о верификации исходного предположения.

#### АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Для идентификации неизвестной детали эксперт выполняет следующие действия:

1. Определяет состояние неизвестной детали металл, раствор в гермооболочке, порошок, плав.

2. Определяет форму детали – цилиндр, труба, параллелепипед, пластина, шар, закрученный вдоль оси стержень. Для малых фрагментов определение формы может быть не очевидным.

3. Определяет поверхности детали, первоначально созданные на металлообрабатывающих станках и сохранившиеся в удовлетворительном состоянии в процессе незаконного оборота и пригодные к измерениям.

4. Проводит измерения геометрических размеров сохранившихся поверхностей – радиусов цилиндрических и сферических поверхностей, толщин пластин или дисков, длины стержней, характеристик фасок, резьбы, мелких отверстий и пр. Измерения проводит либо с 3D-моделью, используя трёхмерный сканер, либо с реальным фрагментом, используя обычный мерительный инструмент, с целыми деталями – штангенциркуль, микрометр и пр., с фрагментами – калибры и шаблоны.

5. Взвешивает деталь, вычисляет объём и оценивает плотность топливного материала.

6. Определяет погрешности измерений.

7. Определяет наличие герметизирующей защитной оболочки, её материал, измеряет толщину оболочки и обращает внимание на особенности маркировки.

8. Оформляет запрос в БД для поиска реактора по результатам измерений с неизвестной деталью. В запросе указывает форму детали (цилиндр, пластина, стержень, шаровая оболочка, ...), её состояние (металл, раствор, порошок, плав, ...), геометрические размеры, топливный материал и его плотность, материал и толщину защитной оболочки, возможную маркировку.

9. Программным способом проверяет совпадение результатов измерений с величинами, хранящимися в БД в соответствующих полях. Если неизвестная деталь действительно принадлежит исследователю реактору, представленному в базе, то она будет обнаружена (т.е. идентифицирована), определена достоверность идентификации и выдан список реакторов, твэлы которых удовлетворяют запросу.

10. Трёхмерная модель неизвестной детали сравнивается с базовой трёхмерной моделью предполагаемого реактора, путем совмещения в 3D-редакторе, и эксперт убеждается в надёжности идентификации.

11. Делает запрос в БД и получает информацию о реакторе/реакторах, в составе которого/которых присутствует идентифицированная деталь, в том числе:

– Тип и назначение реактора.

– Массу делящегося материала в реакторе.

– Дату достижения критичности.

– Перечень организаций, создавших и эксплуатирующих реактор (главный конструктор, разработчик и изготовитель топлива, эксплуатирующая организация и пр.), полное и краткое наименование организаций.

– Страну и город месторасположения реактора, почтовый и юридический адрес, телефон, факс, телеграммы, e-mail, официальный сайт в интернете.

– Перечень всех топливных деталей идентифицированного реактора, их эскизы, чертежи и трёхмерные изображения. При идентификации по фрагменту программа выдаёт чертёж целой детали, её трёхмерное изображение и изображение недостающих частей.

12. Если погрешности измерения линейных размеров велики (например, из-за небрежности измерений или из-за слишком малых размеров фрагмента), то неизвестная деталь либо не будет идентифицирована, либо будет идентифицирована неоднозначно. В этом случае эксперт должен продолжить анализ, использовать более трудоёмкие методы и измерить спектр  $\gamma$ -излучения от детали, обратив внимание на наличие линий, соответствующих ядерному материалу, идентифицировать этот материал и оценить его обогащение.

13. В дальнейшем, при необходимости, следует определить элементный и изотопный состав топливного материала и примеси и повторить запрос на идентификацию. Если совпадения по критериям нет, то либо неизвестная деталь не относится к исследовательским реакторам, либо такого реактора нет в базе данных.

Идентификация на основе измерения геометрических размеров и характеристик топлива применима, главным образом, к необлучённым твэлам и ТВС. Топливо, отработавшее свою кампанию в активной зоне исследовательского реактора, будет иметь высокий уровень остаточного  $\gamma$ -излучения, и любые измерения в интересах противодействия незаконному обороту при такой радиационной обстановке становятся затруднительными, но, с другой стороны, радиация – эффективный защитный барьер от противоправных действий.

Предотвратить незаконный оборот система тренинга не сможет, т.к. идентификация начинается по-

сле пресечения хищения, но результат идентификации сможет оперативно ориентировать правоохранительные органы на розыск недостающих неизвестных деталей и, тем самым, способствовать ликвидации последствий ситуации. Система тренинга может быть предложена как национальным органам в странах, где много исследовательских реакторов, так и международным.

Таким образом, составные части системы тренинга разработаны, и она позволит подготовить экспертов правоохранительных органов и международных организаций к деятельности по идентификации

неизвестных деталей, в отношении которых существуют подозрения, что они являются топливными деталями исследовательских реакторов и содержат ядерные материалы высокого обогащения.

*Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить американских коллег М. Kristo, I. Hutcheon, W. Dunlop (LLNL) и D. Chamberlain (ANL) за постановку работ по созданию базы данных и особо отметить роль А.И. Ульянова в изготовлении макетов деталей.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горин Н.В., Корнеев А.А., Липилина Е.Н., Чуриков Ю.И., Архангельский Н.В. База данных по исследовательским реакторам как инструмент противодействия незаконному обороту ядерных материалов // Вестник НЯЦ РК, выпуск 1 (53), стр.94-102, 2013.
2. Горин Н.В., Чуриков Ю.И., Щербина А.Н., Бобылев А.И., Ровный С.И., Архангельский Н.В., Комков О.В., Павшук В.А., Вурим А.Д., Гайдайчук В.А. Идентификация топливных деталей исследовательских реакторов // Атомная энергия, 2007, т.102, вып.4, с.233-237.
3. Горин Н.В., Чуриков Ю.И., Корнеев А.А., Волошин Н.П., Архангельский Н.В., Простаков В.И., Дикарев В.С., Павшук В.А., Абалин С.С., Шведов О.В., Дерявко И.И., Колбаенков А.Н. Возможности идентификации твэлов/ТВС исследовательских реакторов СССР и США первого поколения // Атомная энергия, 2012, т.113, вып.4, с.218-222.
4. Электронная база данных МАГАТЭ по исследовательским ядерным установкам // <http://nucleus.iaea.org/RRDB/>.
5. Гайдайчук В.А., Дерявко И.И., Пивоваров О.С., Чернядьев В.В. Состояние деталей и материалов в хранилище отработавшего топлива реактора ИГР // Вестник НЯЦ РК, вып.1, 2002, стр.81-86.

#### ЯДРОЛЫҚ МАТЕРИАЛДАРДЫ ЗАҢСЫЗ АЙНАЛЫМҒА ҚАРСЫ ӘРЕКЕТ ЕТУ ҚҰРАЛЫ РЕТІНДЕ ЗЕРТТЕУ РЕАКТОРЛАРЫНЫҢ БЕЛГІСІЗ ОТЫНДЫҚ БӨЛШЕКТЕРДІ СӘЙКЕСТЕНДІРУ БОЙЫНША САРАПШЫЛАРДЫҢ ТРЕНИНГ ЖҮЙЕСІ

<sup>1)</sup> Н.В. Горин, <sup>1)</sup> Н.П. Волошин, <sup>1)</sup> А.А. Корнеев, <sup>1)</sup> Е.Н. Липилина, <sup>1)</sup> И.Г. Стародумова,  
<sup>1)</sup> В.И. Простаков, <sup>1)</sup> Ю.И. Чуриков, <sup>1)</sup> Д.В. Шмаков, <sup>2)</sup> М.К. Скаков, <sup>2)</sup> В.В. Чернядьев

<sup>1)</sup> *Ресей Федерациясы ядролық орталығы Академик Е.И. Забабахин атындағы техникалық физиканың бүкілресейлік ғылыми-зерттеу институты, Снежинск, Ресей*

<sup>2)</sup> *ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясын институты» филиалы, Қурчатов, Қазақстан*

Олар зерттеу реакторларының активтік зоналарының отындық бөлшектері болуына және сондықтан жоғары байытылған ядролық материалдарды сақтауы мүмкін екеніне күмәндары бар ретінде белгісіз бөлшектерді сәйкестендіру тәсілдеріне сарапшыларды оқыту жүйесі ретінде құқық қорғау органдары және халықаралық ұйымдар үшін ядролық материалдарды заңсыз айналымға қарсы әрекет ету құралын құру ұсынды. Жүйенің негізіне әлемдегі барлық зерттеу реакторларының сипаттамалары бойынша деректер базасы негізін салуы тиіс, соның ішінде олардың отындық бөлшектердің сипаттамалары бойынша және осы жағдайда белгісіз бөлшек өлшемдерінің нәтижелері, ядролық материалдар тығыздығы, байыту, элементтік құрам бойынша бөлшегі оған сәйкес келетін реакторды сәйкестендіруге болады. Деректер базасын орнату үшін компьютерге талаптары қалыптастырылды және қазіргі бар офистік техникада толық жеткілікті. Белгісіз бөлшекті сәйкестендіру кезінде сарапшының әрекет ету алгоритмі көрсетілді.

**SYSTEM TO TRAIN EXPERTS IN IDENTIFYING UNKNOWN FUEL ITEMS FROM RESEARCH REACTORS AS A NUCLEAR TRAFFICKING COUNTERMEASURE**

<sup>1)</sup>N.V. Gorin, <sup>1)</sup>N.P. Voloshin, <sup>1)</sup>A.A. Korneev, <sup>1)</sup>E.N. Lipilina, <sup>1)</sup>I.G. Starodumova,  
<sup>1)</sup>V.I. Prostakov, <sup>1)</sup>Yu.I. Churikov, <sup>1)</sup>D.V. Shmakov, <sup>2)</sup>M.K. Skakov, <sup>2)</sup>V.V. Chernyad'yev

<sup>1)</sup>*Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute  
of Technical Physics (RFNC-VNIITF), Snezhinsk, Russia*

<sup>2)</sup>*Institute of Atomic Energy Branch of the RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

An illicit-nuclear-materials-trafficking countermeasure for law enforcement bodies and international organizations is proposed to be developed in the form of a system that can help to train experts in identification of unknown items suspected to be fuel items from research reactor cores and, thus, suspected to comprise a high-enrichment nuclear material. This system will use the database containing characteristics of all research reactors worldwide and, specifically, characteristics of their fuel items. So, measured sizes of an unknown item, measured nuclear material density, enrichment, and composition of elements will enable identification of a reactor hereto the unknown item can belong. Requirements to computer capacities were stated and today's office computers proved to be quite appropriate for this database installation. Algorithm of expert operations in identifying unknown items is presented and with the decrease of their sizes, fragments are demonstrated to provide less information on the shape of an original item.

УДК 550.34:621.039.9

**ПОПРАВКИ ВРЕМЕНИ ЦИФРОВЫХ СЕЙСМОГРАММ  
ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «БОРОВОЕ». 1969 – 1995 гг.**

Ан В.А., Каазик П.Б., Челюбеева Т.В.

*Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия*

Геофизическая обсерватория (ГО) «Боровое» является одной из немногих обсерваторий мира, где с 1966 года регистрация сейсмических событий выполнялась в цифровом формате на магнитную ленту. В статье приведены методика и результаты определения поправок времени по цифровым сейсмограммам ГО «Боровое» за 1969 – 1995 гг.

Нормали магнитных цифровых записей архива геофизической обсерватории «Боровое» приведены в [1]. Однако в этой работе недостаточно полно отражена системная служба времени цифровых станций. В связи с этим рассматриваются блоки службы времени цифровых станций КОД, СЦР-СС и СЦР-ТСГ на моменты регистрации подземных ядерных испытаний [2].

Блок службы времени (БСВ) цифровых станций привязывался в ровную минуту по эталонным сигналам времени (ЭСВ), которые передавались радиостанциями Государственной службы времени и частоты (ГСВЧ СССР): РБМ (Москва), РИД (Иркутск), РТА (Новосибирск) и РЦХ (Ташкент) на частотах порядка 2,5; 5,0; 10,0 и 15,0 МГц [3]. Времена привязки или определения погрешности БСВ, а также величина погрешности и частота радиосигналов ЭСВ заносились в журналы службы времени соответствующих цифровых станций. Радиостанция при этом не уточнялась, так как задержка за счёт времени распространения радиоволн от этих радиостанций до Борового не превышала 0,005 с. Определение погрешности БСВ производилось не реже двух раз в сутки (иногда чаще, во время смены магнитных лент), а также при обнаружении сбоя БСВ. Следует отметить, что ЭСВ ГСВЧ СССР отличаются от сигналов проверки времени (СПВ), которые передавались один раз в час в виде группы из шести радиопульсов длительностью 0,1 сек каждый с периодом следования 1 сек. Начало шестого импульса соответствовало началу часа – 00 мин 00 сек. СПВ передавались (ретранслировались) с погрешностью, не превышающей  $\pm 0,3$  сек для европейской территории СССР и  $\pm 0,5$  сек для других районов страны [3]. На большинстве сейсмических станций бывшего СССР (кроме Антарктиды) использовались сигналы проверки времени (СПВ).

Блок службы времени станции КОД через каждые 30 секунд по всем 5-ти измерительным каналам вместо кода числа записывал один и тот же код «системного времени» от 0,5 мин до 24 часов («штамп»), который может не совпадать с 00 часов по Гринвичу на ровное число часов от 1 до 23-х. Кроме того, в штампе КОД'а нет ни номера станции, ни календарной даты. В течение одного – двух суток

по заданию сейсмолога-интерпретатора производилась перепись необходимых интервалов регистрации на магнитную ленту архивного хранения. Обычно перепись начиналась за 3 – 4 минуты до вступления продольной волны и заканчивалась при уменьшении сигнала до уровня микросейсм. В связи с этим к каждой магнитной ленте прилагался сопроводительный лист, в котором отмечались даты регистрации, времена начала и конца кадров, времена обнаруженных сбоев и «сверки» блока службы времени, а также поправки «системного времени» относительно мирового (Гринвич). Погрешность БСВ станции КОД определялась, как правило, в пределах  $\pm 0,5$  сек от ближайшей минуты. До 00 час 45 мин 31,07.1971 г. погрешность определялась до 0,01 сек. После 11 час 00 мин 31,07.1971 г. она определялась с точностью до 0,001 сек. Это связано с подключением к станции КОД стойки службы времени ССВ-П комплекса «Звезда-1» [1]. В станции КОД в качестве задающего генератора использовались кварцевые часы типа ПКЧ-2. При расхождении часовых или минутных импульсов ПКЧ-2 (в дальнейшем ССВ-П) и БСВ КОД'а более чем на  $\pm 20$  мсек формировался сигнал «сбой»: звуковой и световой на пульте оперативного дежурного, который вызывал инженера, ответственного по комплексу. Дежурный инженер выяснял причину сбоя и при необходимости привязывал БСВ по эталонным сигналам времени.

Станция КОД геофизической обсерватории «Боровое» отличалась от ранее работавших на сейсмических станциях Талгар, Фрунзе (Бишкек) и Нарын [1]. В ГО «Боровое» использовалась 10-тиканальная станция КОД, в которой чётные и нечётные каналы записывались на разные магнитофоны. На один магнитофон записывались каналы большого увеличения (КОДВ), на другой – каналы малого увеличения (КОДМ). При этом каналы большого и малого увеличения вертикальной составляющей (Z) дублировались на обоих магнитофонах. В связи с этим погрешность системного времени всегда одинаковая для одновременной записи КОДВ и КОДМ.

БСВ станций СЦР-СС и СЦР-ТСГ в каждую ровную минуту формировал «штамп»: первая строка – номер станции (от 00 до 15) и две последних цифры

года (от 00 до 99); вторая строка – дата, месяц и десятки часов; третья строка – единицы часов, десятки и единицы минут; четвёртая строка – десятки, единицы и десятые доли секунд. Четвёртая строка «штампа» предусматривалась для записи времени вступления землетрясения (взрыва) при работе СЦР в режиме автоматического анализа сигнала по амплитудному признаку, который в обсерватории «Боровое» практически не использовался [1]. Погрешность БСВ станций СЦР-СС и СЦР-ТСГ определялась до 0.001 сек, как правило, в пределах  $\pm 0.5$  сек от ближайшей минуты. Контроль сбоев БСВ СЦР-СС и СЦР-ТСГ осуществлялся также как и на станции КОД.

При работе всех цифровых станций в Боровом в некоторые интервалы времени погрешность БСВ превышала  $\pm 0.5$  сек (иногда более одной секунды). Это, как правило, было связано с невозможностью привязки БСВ из-за неустойчивого радиоприёма эталонных сигналов времени.

Погрешность БСВ:  $\delta t = t(\text{BRVK}) - t(\text{GMT})$ , где  $t(\text{BRVK})$  – время БСВ соответствующей цифровой станции обсерватории «Боровое»,  $t(\text{GMT})$  – точное время ГСВЧ СССР. При обработке сейсмической информации обычно используется поправка времени:  $\delta T = t(\text{GMT}) - t(\text{BRVK})$ . Другими словами, поправка времени равна погрешности с обратным знаком,  $\delta T = -\delta t$ .

В процессе переформатирования магнитных цифровых записей был подготовлен технический отчёт «Погрешности блоков службы времени цифровых сейсмических станций Геофизической обсерватории «Боровое» (1997 г.). В него были включены погрешности БСВ всех цифровых станций по следующему принципу. На известные моменты проведения подземных ядерных взрывов (ПЯВ) или других техногенных событий, как правило, даны ближайшие предыдущая и последующая погрешности БСВ на момент времени в эпицентре события. В остальных случаях – в интервале времени, когда погрешность БСВ (при отсутствии сбоев) находится в пределах  $\pm 0.5$  сек. Такой принцип построения таблиц связан с тем, что параметры подземных ядерных взрывов (геоцентрические координаты и время) либо опубликованы с высокой точностью (США, Анг-

лия, частично СССР), либо будут опубликованы в обозримое время (Россия, Франция, Китай).

В журналах службы времени цифровых станций используются следующие условные обозначения:

1) «с» – время привязки БСВ к ЭСВ ГСВЧ. В это время погрешность  $\delta t$  может отличаться от нулевого значения. Иногда это связано с радиопомехами в момент привязки. В некоторых случаях это выполнялось специально для увеличения интервала времени между соседними привязками БСВ;

2) «е» – время сбоя БСВ, т.е. когда очередное значение погрешности  $\delta t$  резко отличается от ожидаемого значения. При этом точное время сбоя (сбоев) БСВ на последнем интервале от предыдущего определения  $\delta t$  установить оперативно невозможно. Иногда в этот момент не удаётся определить и величину погрешности. Как правило, после обнаружения сбоя осуществлялась привязка БСВ к ЭСВ ГСВЧ. В некоторых случаях, когда сбой БСВ происходил в пределах  $\pm 0.5$  сек, коррекция БСВ не производилась. При сбое БСВ в часах, минутах, секундах в журнал службы времени соответствующей станции заносилась условная запись «9.999». После такого сбоя привязка БСВ к ЭСВ ГСВЧ выполнялась обязательно;

3) «а» – время выключения БСВ для ремонта или регламентных работ цифровой станции.

Необходимо отметить, что при работе с магнитными цифровыми записями встречались сбой времени в датах, часах, минутах, секундах, которые не связаны с БСВ, а возникли из-за некачественной переписи данного участка магнитной ленты. Как правило, такие участки магнитной записи не восстанавливались.

Журналы службы времени всех цифровых станций хранятся в архиве Геофизической обсерватории «Боровое» (BRVK).

В следующих таблицах даны поправки времени  $\delta T$  цифровых записей станций КОД (KODB – каналы большого увеличения, KODM – каналы малого увеличения), СЦР-СС (SS), СЦР-ТСГ (TSG) на момент проведения подземных ядерных испытаний, которые приведены в [2]. В таблицах 1–3 отмечены параметры почти одновременных взрывов на других площадках Семипалатинского испытательного полигона (СИП), которые при регистрации могут накладываться друг на друга [4].

Таблица 1. Поправки времени цифровых сейсмограмм ПЯВ на площадке Балапан СИП (1968 – 1989 гг.)

№ п/п	Дата гг-мм-дд	м <sup>б</sup>	Поправка времени BRVK ( $\delta T$ ), сек	№ п/п	Дата гг-мм-дд	м <sup>б</sup>	Поправка времени BRVK ( $\delta T$ ), сек
1	1968-06-19	5.4	KODBM +0.26	48	1981-11-29	5.7	SS +0.007 TSG -0.025
2	1969-11-30	6.0	KODBM +0.10	49	1981-12-27	6.2	SS +0.010 TSG -0.014
3	1971-06-30	5.2	KODBM -0.53	50	1982-04-25	6.1	SS +0.017 TSG -0.002
4	1972-02-10	5.4	KODBM +0.140	51	1982-07-04	6.1	SS 0.000 TSG -0.001
5	1972-11-02	6.1	KODB -0.194	52	1982-08-31	5.3	SS +0.001 TSG -0.006
6	1972-12-10	6.0	KODBM +0.132	53	1982-12-05	6.1	SS +0.001 TSG -0.001
7	1973-07-23	6.1	KODBM +0.053	54	1982-12-26	5.7	SS +0.016 TSG -0.003
8	1974-12-27	5.6	TSG -0.184	55	1983-06-12	6.1	SS +0.004 TSG -0.017
9	1975-10-29	5.8	SS +0.120 TSG +0.214	56	1983-10-06	6.0	SS +0.010
10	1975-12-25	5.7	TSG +0.294	57	1983-10-26	6.1	SS +0.013 TSG 0.000

**ПОПРАВКИ ВРЕМЕНИ ЦИФРОВЫХ СЕЙСМОГРАММ  
ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «БОРОВОЕ». 1969 – 1995 гг.**

№ п/п	Дата г-мм-дд	м <sub>б</sub>	Поправка времени BRVK (δT), сек	№ п/п	Дата г-мм-дд	м <sub>б</sub>	Поправка времени BRVK (δT), сек
11	1976-04-21 Д	5.3	SS +0.007 TSG +0.021	58	1983-11-20	5.5	SS -0.001 TSG -0.010
12	1976-06-09	5.3	TSG +0.153	59	1984-02-19	5.9	SS 0.000
13	1976-07-04	5.8	SS +0.231 TSG +0.035	60	1984-03-07	5.7	SS 0.000
14	1976-08-28	5.8	SS +0.104 TSG +0.158	61	1984-03-29	5.9	SS +0.004 TSG -0.001
15	1976-11-23	5.8	SS +0.056	62	1984-04-25	6.0	SS +0.012 TSG -0.003
16	1976-12-07	5.9	SS +0.297 TSG -0.006	63	1984-05-26	6.1	SS -0.007 TSG 0.000
17	1976-12-07		SS +0.297 TSG -0.006	64	1984-07-14	6.2	SS +0.003 TSG -0.023
18	1977-05-29	5.8	SS +0.274 TSG +0.032	65	1984-10-27	6.2	SS +0.015 TSG -0.006
19	1977-06-29	5.3	SS +0.037 TSG 0.000	66	1984-12-02	5.9	SS +0.016 TSG -0.020
20	1977-09-05	5.8	SS -0.004 TSG -0.059	67	1984-12-16	6.1	SS +0.021 TSG -0.007
21	1977-10-29 Д	5.6	SS +0.162 TSG -0.016	68	1984-12-28	6.0	SS +0.025 TSG -0.007
22	1977-11-30	6.0	SS -0.043 TSG 0.000	69	1985-02-10	5.9	SS +0.014
23	1978-06-11	5.9	SS -0.020 TSG -0.022	70	1985-04-25	5.9	SS +0.015
24	1978-07-05	5.8	SS -0.216 TSG 0.000	71	1985-06-15	6.1	SS +0.001 TSG -0.002
25	1978-09-15	6.0	SS +0.081 TSG -0.044	72	1985-06-15		SS +0.001 TSG -0.002
26	1978-11-04	5.6	SS +0.070 TSG -0.017	73	1985-06-30	6.0	SS +0.004 TSG -0.017
27	1978-11-29 Д	6.0	SS +0.062 TSG -0.063	74	1985-07-20	6.0	SS +0.001 TSG -0.026
28	1979-02-01	5.4	SS -0.304 TSG -0.025	75	1987-03-12	5.6	SS +0.004 TSG -0.012
29	1979-06-23	6.2	TSG -0.008	76	1987-04-03 Д	6.2	SS +0.002 TSG -0.014
30	1979-07-07	5.8	SS +0.052	77	1987-04-17 Д	6.0	SS +0.001 TSG -0.011
31	1979-08-04	6.1	SS +1.042 TSG -0.007	78	1987-06-20	6.1	SS +0.001 TSG -0.026
32	1979-08-18	6.1	SS -0.068 TSG -0.030	79	1987-08-02	5.9	SS +0.001 TSG -0.002
33	1979-10-28	6.0	SS +0.104 TSG -0.005	80	1987-11-15	6.1	SS +0.004
34	1979-12-02	6.0	SS -0.104 TSG -0.026	81	1987-12-13	6.1	SS +0.398
35	1979-12-23	6.2	SS +0.096 TSG +0.024	82	1987-12-27	6.1	SS -0.013
36	1980-04-25	5.5	SS -0.105	83	1988-02-13	6.1	SS +0.010 TSG -0.003
37	1980-06-12	5.6	SS +0.078 TSG +0.036	84	1988-04-03	6.0	SS -0.003 TSG -0.020
38	1980-06-29	5.7	SS -0.047 TSG +0.014	85	1988-05-04	6.1	SS -0.014 TSG -0.008
39	1980-09-14	6.2	SS +0.225	86	1988-06-14	5.1	SS -0.032 TSG -0.017
40	1980-10-12	5.9	SS +0.326 TSG -0.022	87	1988-09-14	6.1	SS +0.001 TSG 0.000
41	1980-12-14	5.9	SS -0.068 TSG -0.003	88	1988-11-12	5.7	SS +0.006 TSG -0.004
42	1980-12-27	5.9	SS +0.016 TSG +0.005	89	1988-12-17	5.9	SS -0.001 TSG -0.006
43	1981-03-29	5.6	SS +0.199 TSG +0.062	90	1989-01-22	6.1	SS +0.006 TSG -0.014
44	1981-04-22	6.0	SS -0.013 TSG +0.001	91	1989-02-12	5.9	SS +0.009 TSG +0.006
45	1981-05-27	5.5	SS -0.052 TSG 0.000	92	1989-07-08	5.6	SS +0.005 TSG 0.000
46	1981-09-13	6.1	SS +0.050 TSG -0.017	93	1989-09-02	5.0	SS +0.015 TSG -0.010
47	1981-10-18	6.1	SS +0.027 TSG -0.004	94	1989-10-19	6.0	SS -0.001 TSG -0.002

Примечания: «Дата» по [5]; даты **полу жирным** шрифтом – испытания, произведенные на площадке Балапан практически одновременно; **Д** – примерно в это же время были испытания на площадке Дегелен [4].

*Таблица 2. Поправки времени цифровых сейсмограмм ПЯВ на площадке Дегелен СИП (1967-1989 гг.)*

№ п/п	Дата г-мм-сек	м <sub>б</sub>	Поправка времени BRVK (δT), сек	№ п/п	Дата г-мм-сек	м <sub>б</sub>	Поправка времени BRVK (δT), сек
1	1967-02-26	6.0	KODB -0.63	63	1977-07-30	5.1	SS +0.023 TSG -0.014
2	1967-04-20	5.5	KODB +0.03	64	1977-08-17	5.1	SS +0.286 TSG -0.075
3	1967-05-28	5.4	KODB -0.84	65	1977-12-26	4.9	SS -0.120 TSG -0.010
4	1967-06-29	5.3	KODBM -0.24	66	1977-12-26		SS -0.120 TSG -0.010
5	1967-07-15	5.4	KODB -0.13	67	1977-12-26		SS -0.120 TSG -0.010
6	1967-08-04	5.3	KODBM +0.02	68	1978-03-26	5.6	SS -0.145 TSG -0.016
7	1967-09-02	4.1	KODB +0.05	69	1978-04-22	5.3	TSG -0.032
8	1967-10-17	5.6	KODBM 0.00	70	1978-05-29	4.7	SS -0.215 TSG -0.014
9	1967-10-30	5.3	KODBM -0.29	71	1978-07-28	5.7	TSG -0.022
10	1967-12-08	5.4	KODB -0.07	72	1978-08-29 Б	5.2	SS -0.201
11	1968-01-07	5.1	KODB +0.07	73	1978-10-15	5.2	SS +0.154 TSG -0.035
12	1968-04-24	5.0	KODB +0.04	74	1978-10-31	5.2	SS -0.003 TSG +0.020
13	1968-06-11	5.2	KODBM -0.46	75	1978-12-14	4.8	SS +0.345 TSG -0.071
14	1968-11-09	4.9	KODB -0.25	76	1978-12-20	4.7	SS -0.249 TSG -0.111
15	1968-12-18	5.0	KODBM -0.01	77	1979-05-06	5.2	SS +0.095 TSG +0.002
16	1969-03-07	5.6	KODBM +0.08	78	1979-05-31	5.3	SS -0.217 TSG -0.001
17	1969-05-16	5.2	KODBM -0.14	79	1979-05-31		SS -0.217 TSG -0.001
18	1969-07-04	5.2	KODBM +0.40	80	1979-09-27	4.5	SS -0.118 TSG -0.009
19	1969-07-23	5.4	KODBM +0.23	81	1979-10-18	5.2	SS +0.010 TSG -0.037
20	1969-09-11	5.0	KODBM +0.02	82	1979-11-30	4.5	SS -0.133 TSG -0.012
21	1969-10-01	5.2	KODBM -0.26	83	1979-12-21	4.7	SS +0.071 TSG -0.057
22	1969-12-29	5.1	KODB -0.39	84	1980-04-10	5.0	SS -0.009 TSG -0.049
23	1970-01-29	5.5	KODBM +0.19	85	1980-05-22	5.5	SS +0.179 TSG -0.018

**ПОПРАВКИ ВРЕМЕНИ ЦИФРОВЫХ СЕЙСМОГРАММ  
ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «БОРОВОЕ». 1969 – 1995 гг.**

№ п/п	Дата г-мм-сек	т <sub>б</sub>	Поправка времени BRVK (ΔT), сек	№ п/п	Дата г-мм-сек	т <sub>б</sub>	Поправка времени BRVK (ΔT), сек
24	1970-03-27	5.0	KODBM -0.29	86	1980-07-31	5.3	SS +0.050 TSG -0.017
25	1970-05-27	3.8	KODB -0.87	87	1980-09-25	4.7	SS -0.050 TSG -0.048
26	<b>1970-06-28</b>	5.7	KODBM -0.26	88	1981-06-30	5.2	SS +0.003 TSG -0.017
27	<b>1970-06-28</b>		KODBM -0.26	89	1981-07-17	5.2	TSG -0.004
28	1970-07-24	5.3	KODBM -0.46	90	1981-08-14	5.0	SS +0.035 TSG +0.004
29	<b>1970-09-06</b>	5.4	KODBM -0.21	91	1981-11-20	5.1	SS -0.003
30	<b>1970-09-06</b>		KODBM -0.21	92	1981-12-22	5.1	SS +0.011 TSG -0.007
31	1970-12-17	5.4	KODBM +0.19	93	1982-02-19	5.4	SS +0.017 TSG -0.009
32	1971-01-29	4.4	KODB -0.15	94	1982-06-25	4.2	SS +0.012 TSG -0.010
33	<b>1971-03-22</b>	5.7	KODBM +0.01	95	1982-08-23	4.7	SS +0.001
34	<b>1971-03-22</b>		KODBM +0.01	96	1982-09-21	5.2	SS +0.020 TSG 0.000
35	1971-04-25	5.9	KODBM +0.29	97	1982-12-25	4.8	SS +0.015 TSG -0.002
36	1971-05-25	5.1	KODBM +0.13	98	1983-03-30	4.9	SS +0.017 TSG -0.015
37	1971-11-29	5.4	KODBM +0.151	99	1983-04-12	4.9	SS +0.003 TSG -0.008
38	1971-12-15	4.9	KODB +0.066	100	1983-05-30	5.5	SS +0.003
39	<b>1971-12-30</b>	5.8	KODBM -0.030	101	1983-06-24	4.7	SS +0.007 TSG -0.007
40	<b>1971-12-30</b>		KODBM -0.030	102	1983-09-11	4.9	SS -0.019 TSG -0.014
41	1972-03-10	5.4	KODM -0.105	103	<b>1983-11-29</b>	5.4	SS +0.004
42	1972-03-28	5.1	KODBM +0.376	104	<b>1983-11-29</b>	5.4	SS +0.004
43	<b>1972-06-07</b>	5.4	KODBM -0.232	105	1983-12-26	5.6	SS +0.002 TSG -0.027
44	<b>1972-06-07</b>		KODBM -0.232	106	1984-04-15	5.7	SS +0.012 TSG -0.015
45	1972-08-16	5.0	KODBM +0.212	107	1984-09-09	5.1	SS +0.023 TSG -0.008
46	<b>1972-12-10 Б</b>	5.6	KODBM +0.132	108	1984-10-18	4.5	SS +0.001 TSG 0.000
47	<b>1972-12-10 Б</b>		KODBM +0.132	109	1984-11-23	4.7	SS +0.011 TSG -0.027
48	1972-12-28	4.9	KODB -0.085	110	1985-07-25	5.0	SS +0.006 TSG -0.012
49	1973-02-16	5.5	KODBM +0.090	111	1987-02-26	5.4	SS +0.001 TSG -0.021
50	1973-07-10	5.2	KODB +0.182	112	1987-05-06	5.6	SS -0.004 TSG -0.009
51	1973-10-26	5.2	KODBM +0.088	113	1987-06-06	5.4	SS 0.000 TSG -0.004
52	1974-12-16	5.0	TSG -0.158	114	1987-07-17	5.8	SS 0.000
53	1974-12-16	4.8	TSG -0.158	115	1987-09-18	4.3	SS +0.095
54	1975-12-13	5.1	SS -0.242 TSG -0.196	116	1987-10-16	4.6	SS +0.005 TSG -0.011
55	1976-01-15	5.2	SS -0.218 TSG +0.192	117	1987-12-20	4.8	SS +0.004 TSG -0.007
56	1976-04-21 Б	5.1	SS +0.007 TSG +0.022	118	1988-02-06	4.8	SS 0.000 TSG -0.022
57	1976-05-19	5.0	SS -0.130	119	1988-04-22	4.9	SS -0.004 TSG -0.026
58	1976-07-23	5.1	SS +0.123	120	1988-10-18	4.9	SS +0.010 TSG -0.020
59	1976-10-30	4.7	SS +0.020 TSG +0.002	121	1988-11-23	5.3	SS 0.000 TSG -0.026
60	1976-12-30	5.2	TSG -0.091	122	1988-12-28	3.9	SS +0.002 TSG -0.005
61	1977-03-29 <b>СУ</b>		SS +0.339 TSG -0.013	123	1989-02-17	5.0	SS +0.011 TSG -0.015
62	1977-04-25	5.1	SS -0.082 TSG -0.009	124	1989-10-04	4.7	SS +0.019 TSG -0.002

Примечания: «Дата» по [5]; даты **полужирным** шрифтом – испытания, произведенные практически одновременно;  
**Б, СУ** – примерно в это же время испытания были на площадках Балапан или Сары-Узень [4]

Таблица 3. Поправки времени цифровых сейсмограмм ПЯВ на площадке Сары-Узень СИП (1966–1980)

№ п/п	Дата г-мм-дд	т <sub>б</sub>	Поправка времени BRVK (ΔT), сек	№ п/п	Дата г-мм-дд	т <sub>б</sub>	Поправка времени BRVK (ΔT), сек
1	1966-12-18	5.8	KODB -0.04	11	1971-10-09	5.3	KODBM +0.113
2	1967-09-16	5.3	KODBM -0.02	12	1971-10-21	5.5	KODBM +0.230
3	1967-09-22	5.2	KODB -0.32	13	1972-08-26	5.3	KODBM -0.237
4	1967-11-22	4.8	KODB -0.24	14	1973-04-19	5.4	KODBM -0.184
5	1969-05-31	5.3	KODBM +0.05	15	1976-08-04	4.1	SS +0.324
6	1969-12-28	5.7	KODBM -0.26	16	1978-03-19	5.2	SS +0.113 TSG -0.007
7	1970-07-21	5.4	KODBM -0.06	17	<b>1979-02-16</b>	5.4	SS +0.051 TSG -0.011
8	1970-11-04	5.4	KODBM +0.29	18	<b>1979-02-16</b>		SS +0.051 TSG -0.011
9	1971-06-06	5.5	KODBM -0.20	19	1979-07-18 Д	5.2	SS +0.031 TSG -0.097
10	1971-06-19	5.4	KODBM -0.33	20	1980-04-04	4.9	SS -0.139 TSG -0.056

Примечания: «Дата» по [5]; даты **полужирным** шрифтом – испытания, произведенные практически одновременно;  
**Д** – примерно в это же время был взрыв на площадке Дегелен [4]

Таблица 4. Поправки времени цифровых сейсмограмм мирных ПЯВ СССР (1967 – 1988 гг.)

№ п/п	Дата г-мм-дд	т <sub>б</sub>	Поправка времени BRVK (ΔT), сек	№ п/п	Дата г-мм-дд	т <sub>б</sub>	Поправка времени BRVK (ΔT), сек
1	1967-10-06	4.7	KODB -0.02	41	1978-10-17	5.5	SS +0.190
2	1968-05-21	5.4	KODB +0.28	42	1978-12-18	5.9	SS -0.233 TSG -0.102
3	1969-09-02	4.8	KODB +0.27	43	1979-01-17	6.0	SS +0.396 TSG -0.332
4	1969-09-08	4.8	KOD +0.52	44	1979-07-14	5.6	SS +0.138 TSG -0.063
5	1969-09-26	5.6	KOD +0.29	45	1979-08-12	4.9	SS -0.153 TSG -0.029

**ПОПРАВКИ ВРЕМЕНИ ЦИФРОВЫХ СЕЙСМОГРАММ  
ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «БОРОВОЕ». 1969 – 1995 гг.**

№ п/п	Дата г-мм-дд	мь	Поправка времени BRVK (δT), сек	№ п/п	Дата г-мм-дд	мь	Поправка времени BRVK (δT), сек
6	1969-12-06	5.8	KOD -0.37	46	1979-09-06	4.9	SS +0.205 TSG -0.028
7	1970-06-25	4.9	KODB +0.11	47	1979-10-04	5.4	SS -0.004 TSG -0.003
8	1970-12-12	6.0	KOD -0.31	48	1979-10-07	5.0	SS +0.060 TSG -0.019
9	1970-12-23	6.0	KOD -0.35	49	1979-10-24	5.8	SS +0.059 TSG -0.013
10	1971-03-23	5.5	KOD -0.08	50	1980-10-08	5.2	SS +0.242
11	1971-07-02	4.7	KODB +0.33	51	1980-11-01	5.2	TSG +0.002
12	1971-09-19	4.5	KODB +0.15	52	1981-05-25	5.5	SS -0.094
13	1971-10-04	4.6	KODB +0.064	53	1981-09-02	4.4	TSG -0.011
14	1971-12-22	6.0	KOD +0.095	54	1981-09-26	5.2	TSG -0.028
15	1972-04-11	4.9	KODB +0.030	55	1981-09-26	5.3	TSG -0.028
16	1972-07-09	4.8	KODB -0.018	56	1981-10-22	5.1	TSG -0.009
17	1972-08-20	5.7	KOD +0.352	57	1982-07-30	5.0	TSG -0.033
18	1972-09-04	4.6	KODB -0.087	58	1982-09-25	5.2	TSG 0.000
19	1972-09-21	5.0	KODB -0.188	59	1983-07-10	5.3	SS +0.025
20	1972-10-03	5.6	KODB +0.214	60	1983-07-10	5.3	SS +0.025
21	1972-11-24	4.5	KODB +0.375	61	1983-07-10	5.3	SS +0.025
22	1973-08-15	5.3	KOD +0.169 SS -0.139	62	1983-09-24	5.2	SS +0.003
23	1973-08-28	5.2	KOD +0.217 SS +0.055	63	1983-09-24	5.1	SS +0.003
24	1973-09-19	5.1	KOD +0.117 SS +0.148	64	1983-09-24	5.0	SS +0.003
25	1973-09-30	5.2	KODB -0.065	65	1983-09-24	5.2	SS +0.003
26	1973-10-26	4.8	KODB +0.105	66	1983-09-24	5.4	SS +0.003
27	1974-08-29	5.0	SS +0.130	67	1983-09-24	5.3	SS +0.003
28	1975-09-29	4.8	SS +0.272	68	1984-07-21	5.4	SS +0.009
29	1976-03-29	4.3	SS 0.000 TSG -0.017	69	1984-07-21	5.3	SS +0.009
30	1976-07-29	5.9	SS +0.217 TSG +0.248	70	1984-07-21	5.4	SS +0.009
31	1976-11-05	5.3	SS +0.128	71	1984-08-25	5.3	SS +0.015
32	1977-07-26	5.0	SS -0.025 TSG -0.021	72	1984-09-17	5.0	TSG -0.020
33	1977-08-20	5.0	TSG +0.019	73	1984-10-27	5.0	SS +0.013 TSG -0.006
34	1977-09-10	4.8	SS +0.124 TSG -0.002	74	1984-10-27	5.0	SS +0.013 TSG -0.006
35	1977-09-30	5.0	SS -0.002	75	1987-07-24	5.1	SS +0.001
36	1978-08-09	5.6	SS +0.226	76	1987-08-12	5.0	SS -0.008
37	1978-08-24	5.1	SS +0.520 TSG -0.012	77	1987-10-03	5.3	SS -0.008 TSG 0.000
38	1978-09-21	5.2	SS +0.189 TSG -0.048	78	1988-08-22	5.3	SS -0.007 TSG 0.000
39	1978-10-08	5.2	SS +0.049	79	1988-09-06	4.8	SS 0.000 TSG -0.006
	1978-10-17	5.8	SS +0.185				

Примечания: «Дата» по [5, 6]

*Таблица 5. Поправки времени цифровых сейсмограмм ПЯВ на полигоне Лобнор КНР (1969 – 1995 гг.)*

№ п/п	Дата г-мм-дд	мь	Поправка времени BRVK (δT), сек	№ п/п	Дата г-мм-дд	мь	Поправка времени BRVK (δT), сек
1	1969-09-22	5.2	KODB -0.030	7	1987-06-05	6.2	SS 0.000 TSG -0.004
2	1976-10-17	4.9	SS +0.211	8	1990-08-16	6.2	SS +0.011 TSG -0.022
3	1978-10-14	4.9	SS +0.137 TSG -0.029	9	1993-10-05	5.9	TSG нет δT
4	1983-10-06	5.5	SS +0.010 TSG -0.013	10	1994-10-07	5.9	TSG нет δT
5	1984-10-03	5.4	SS +0.013	11	1995-05-15	6.1	TSG нет δT
6	1984-12-19	4.7	SS +0.022 TSG -0.014				

Примечания: «Дата» по [2, 7]

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Ан, В.А. О нормальных магнитных цифровых записей архива геофизической обсерватории «Боровое» / В.А. Ан, И.П. Башилов, П.Б. Каазик, В.А. Коновалов // Вестник НЯЦ РК, 2010. – Вып. 3. – С. 62 – 69.
2. An, V.A. A digital seismogram archive of nuclear explosion signals, recorded at the Borovoye Geophysical Observatory, Kazakhstan, from 1966 to 1996 / V.A. An, V.M. Ovtchinnikov, P.B. Kaazik, V.V. Adushkin, I.N. Sokolova, I.B. Aleschenko, N.N. Mikhailova, W-Y. Kim, P.G. Richards, H.J. Patton, W.S. Phillips, G. Randall, D. Baker // GeoResJ, 2015. – No. 6. – P. 141 – 163.
3. Эталонные сигналы частоты и времени // Бюллетень В-07-1986. – М.: Изд-во стандартов. – 1986. – 26 с.
4. Ан, В.А. Линейный тренд времени пробега продольной сейсмической волны / В.А. Ан, Л.Д. Годунова, П.Б. Каазик // Вестник НЯЦ РК, 2014. – Вып. 2 (58). – С. 81 – 94.
5. Ядерные испытания СССР. Под ред. В.Н. Михайлова. – М.: ИздАТ, 1997. – 304 с.
6. Sultanov, D.D. A seismic source summary for Soviet peaceful nuclear explosions / D.D. Sultanov, J.R. Murphy, Kh.D. Rubinstein // Bull. Seism. Soc. Am., 1999. – V. 89. – No. 3. – P. 640 – 647.
7. Waldhauser, F. Lop Nor revisited: underground nuclear explosion locations, 1976-1996, from double-difference analysis of regional and teleseismic data / F. Waldhauser, D. Schaff, P.G. Richards, W-Y. Kim // Bull. Seism. Soc. Am., 2004. – V. 94. – P. 1879 – 1889.

**«БУРАБАЙ» ГЕОФИЗИКАЛЫҚ ОБСЕРВАТОРИЯСЫНЫҢ ЦИФРЛЫҚ  
СЕЙСМОГРАММАЛАРЫНЫҢ УАҚЫТТАРЫН ТҮЗЕТУ. 1969 – 1995 жж.**

**Ан А.А., Каазик П.Б., Челюбеева Т.В.**

*РФА Геосфералар динамикасы институты, Москва, Ресей*

«Бурабай» геофизикалық обсерваториясы (ГО). 1966 жылдан бастап магнитті лентаға цифрлық пішінде сейсмикалық оқиғаларды тіркеу жүргізілген, әлемдегі азғана обсерваториялардың бірі болып табылады. Мақалада 1969 – 1995 жж. «Бурабай» ГО цифрлық сейсмограммалары бойынша уақытты түзетуді анықтау нәтижелері мен әдістемелері берілген.

**TIME CORRECTIONS FOR DIGITAL SEISMOGRAMS  
AT “BOROVOYE” GEOPHYSICAL OBSERVATORY. 1969 – 1995**

**V.A. An, P.B. Kaazik, T.V. Chelyubeyeva**

*Institute of Geosphere Dynamics RAS, Moscow, Russia*

“Borovoye” Geophysical Observatory (GO) is one of few observatories of the world where seismic events have been recorded onto magnetic tape in digital format since 1966. The paper provides the technique and results of time corrections calculation using digital seismograms of “Borovoye” GO for 1969 – 1995.

УДК 550.34

## АНАЛИЗ КОЛЬЦЕВЫХ СТРУКТУР СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ ЗАПАДНОГО КАВКАЗА: ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

<sup>1)</sup> Копничев Ю.Ф., <sup>2)</sup> Соколова И.Н.

<sup>1)</sup> *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия*

<sup>2)</sup> *Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан*

Рассматриваются некоторые характеристики сейсмичности в районе Западного Кавказа, начиная с 1961 г. Установлено, что перед двумя сильными землетрясениями – Спитакским 07.12.1988 г. ( $M_w=6.8$ ) и Рачинским 29.05.1991 г. ( $M_w=7.0$ ) сформировались кольцевые структуры сейсмичности на глубинах 0 - 33 км. Кольца сейсмичности характеризуются пороговыми значениями магнитуд ( $M_p$ ) и длинами больших осей ( $L$ ). Ранее были получены корреляционные зависимости величин  $M_p$  и  $lgL$  от магнитуды главных событий  $M_w$  для внутриконтинентальных землетрясений с механизмами типа взброса и взбросодвига, преобладающими в районе Западного Кавказа. На основе этих зависимостей сделаны оценки магнитуд сильных событий, которые могли готовиться в областях кольцевых структур:  $M_w=6.5\pm 0.3$  и  $M_w=7.1\pm 0.4$  соответственно для зон Спитакского и Рачинского землетрясений. Эти величины достаточно близки к реальным магнитудам указанных событий. Выделены крупные кольцевые структуры, формирующиеся на западной окраине Большого Кавказа и в области Западной Грузии, где неизвестны сильные землетрясения по инструментальным и историческим данным. По характеристикам этих структур оценены магнитуды возможных сильных землетрясений:  $M_w=7.0\pm 0.5$  и  $M_w=7.0\pm 0.3$  в указанных областях, соответственно. Особую опасность может представлять сильное сейсмическое событие, которое, вероятно, готовится на крайнем западе Большого Кавказа, вследствие большой плотности населения и близости ряда крупных городов – Краснодара, Новороссийска, Сочи и др. Предполагается, что формирование кольцевых структур есть следствие процессов самоорганизации геологических систем, связанных с миграцией глубинных флюидов.

### ВВЕДЕНИЕ

В [1 - 4] показано, что перед многими сильными внутриконтинентальными землетрясениями в литосфере формируются кольцевые структуры сейсмичности. Такие структуры проявляются главным образом в диапазоне глубин 0 - 33 км, но в некоторых случаях (например, на границе Памира и Тянь-Шаня) – также на глубинах 34 - 70 км [5]. Такие структуры обычно имеют форму, близкую к эллипсам, они характеризуются пороговыми значениями магнитуд и длинами больших осей. Установлено, что эти величины коррелируются с магнитудами главных событий  $M_w$ , при этом корреляционные зависимости существенно различаются для разных типов механизмов в очаге [4]. Длительность формирования кольцевых структур  $T_p$ , как правило, не превышает 40 лет, в среднем она равна  $25\pm 5$  годам [3]. Имеющиеся данные показывают, что по параметрам кольцевых структур можно оценивать магнитуды готовящихся сильных землетрясений [2, 5]. Кроме того, текущие величины  $T_p$ , вероятно, могут быть использованы для целей среднесрочного прогноза сейсмических событий. В данной статье проводится изучение характеристик кольцевых структур в районе Западного Кавказа, как сформировавшихся перед двумя сильными землетрясениями конца XX-го века, так и проявившихся в последние годы в областях, где в историческое время не было сильных событий.

### ИСТОРИЧЕСКАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ

Начиная с 1900 г. в исследуемом районе ( $40 - 46^\circ N$ ,  $37 - 45^\circ E$ ) произошло 9 землетрясений с  $M \geq 6.0$  (рисунок 1, таблица 1).

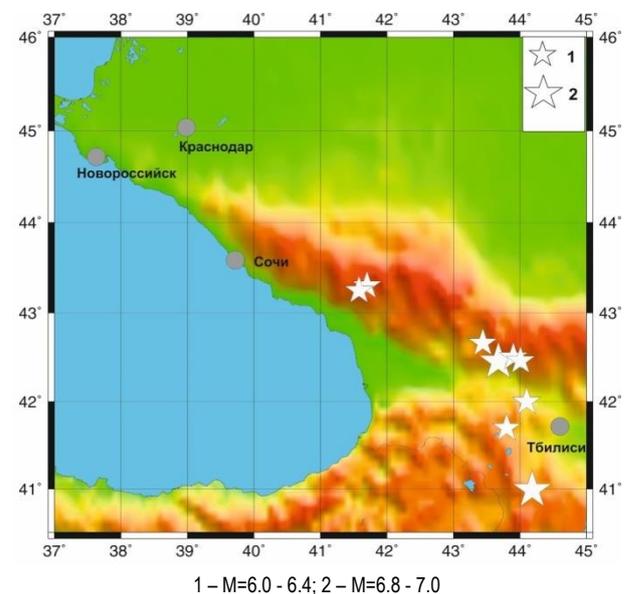


Рисунок 1. Сильные землетрясения в районе Западного Кавказа с начала XX-го века

Наиболее сильным было Рачинское землетрясение 29.04.1991 г. в районе Большого Кавказа ( $M_w=7.0$ ), которое сопровождалось двумя афтершоками с  $M_w > 6.0$ . Кроме того, к западу от очаговой зо-

ны Рачинского землетрясения зарегистрированы три события с  $M=6.0 - 6.4$  (в 1905, 1963 и 2009 гг.). Еще одно сильное землетрясение, сопровождавшееся наибольшими разрушениями и человеческими жертвами, произошло в районе Малого Кавказа (Спитакское, 07.12.1988 г.,  $M_w=6.8$ ). И, наконец, к западу от г. Тбилиси произошли Карглийское землетрясение 1920 г. ( $M=6.2$ ) и Табацкурское 1940 г. ( $M=6.0$ ). Все перечисленные события произошли в горных районах. Согласно палеосейсмическим данным, средний период повторяемости землетрясений с  $M_w \sim 7.0$  составляет на Северном Кавказе порядка 1.5 - 2 тыс. лет [6], а в зоне очага Спитакского землетрясения – от 6 до 10 тыс. лет [7].

*Таблица 1. Сильные землетрясения в районе Западного Кавказа с начала XX-го века*

Дата			Координаты		M
год	мес	день	широта°N	долгота°E	
1905	10	21	43.3	41.7	6.4
1920	2	20	42	44.1	6.2
1940	5	7	41.7	43.8	6.0
1963	7	16	43.25	41.58	6.4
1988	12	7	40.99	44.19	6.8
1991	4	29	42.45	43.67	7.0
1991	4	29	42.50	43.89	6.1
1991	6	15	42.46	44.01	6.3
2009	9	7	42.66	43.44	6.0

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

При исследованиях использовались главным образом каталоги NEIC (National Earthquake Information Center) Геологической службы США (USGS - United States Geological Survey), начиная с 1973 г. Кроме того, при изучении сейсмичности в очаговых зонах двух сильных землетрясений (Рачинского и Спитакского) и их окрестностях дополнительно привлекались данные из монографии [8] за 1961 - 1972 гг.

Методика выделения кольцевых структур имеет следующие особенности:

1. Длительность периода, в течение которого исследуются характеристики сейсмичности, составляет около 40 лет, что соответствует максимальным величинам, известным в настоящее время.

2. Рассматриваются параметры сейсмичности в двух диапазонах глубин: 0 - 33 и 34 - 70 км, в которых формируются кольцевые структуры. Для каждого диапазона отбираются события, магнитуда которых не меньше пороговой (соответственно  $M_{p1}$  и  $M_{p2}$ ), причем эти величины обычно на 2 - 3 единицы меньше, чем магнитуда главного землетрясения.

3. Проводится перебор пороговых величин магнитуд  $M_p$  (в обоих диапазонах глубин) с целью определения оптимальных значений, при которых кольцевые структуры выделяются наиболее четко.

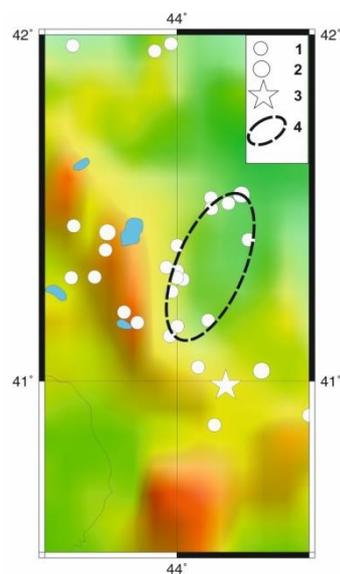
4. Кольцевые структуры аппроксимируются, как правило, эллипсами. Кольца сейсмичности строятся таким образом, чтобы примерно равное количество относительно слабых событий находилось по обе стороны контуров эллипсов. Принимается, что кольцо сейсмичности сформировалось, если максимальная ширина полосы эпицентров, формирующих его (сумма наибольших отклонений эпицентров, расположенных соответственно внутри и вне эллипса, от его контура), не превышает  $1/4$  длины малой оси эллипса (критерий качества кольцевой структуры).

5. Выбираются кольцевые структуры с наибольшими возможными пороговыми значениями  $M_{p1}$  и  $M_{p2}$ . При прочих равных условиях выбирается кольцо сейсмичности с максимальной длиной большой оси эллипса (соответственно L и l для мелкого и глубокого колец).

6. Регулярно (не реже, чем раз в полгода) необходимо контролировать параметры сейсмичности, поскольку известны случаи, когда за последние 1 - 2 года проявлялись новые кольцевые структуры с гораздо большими величинами  $M_p$ , как это было, например, перед Великим землетрясением Тохоку 11 марта 2011 г. [9].

### АНАЛИЗ ДАННЫХ

Рассмотрим сначала данные о сейсмичности перед двумя сильными землетрясениями – Спитакским 07.12.1988 и Рачинским 29.04.1991 гг. На рисунке 2 показаны характеристики неглубокой сейсмичности перед катастрофическим Спитакским землетрясением 7 декабря 1988 г., в результате которого, по официальным данным, погибли более 25 тыс. человек. Это событие произошло в районе Малого Кавказа.



Эпицентры землетрясений: 1 –  $M=4.0 - 4.9$ ; 2 -  $M \geq 5.0$ ;  
3 – эпицентр Спитакского землетрясения; 4 – кольцевая структура

*Рисунок 2. Неглубокая сейсмичность в зоне очага Спитакского землетрясения и ее окрестностях*

В 1964-1983 гг. в окрестностях будущего очага сформировалась узкая кольцевая структура ( $M_{п1}=4.0$ ,  $L\sim 50$  км), ориентированная в субмеридиональном направлении. Самое сильное событие в области кольца сейсмичности зарегистрировано в 1978 г. ( $M=5.3$ ). Эпицентр Спитакского землетрясения находился к югу от кольца сейсмичности, на расстоянии  $\sim 15$  км от его границы, что в несколько раз меньше длины большой оси.

Наибольшая скорость сейсмостектонической деформации (СТД) наблюдалась в 1977 - 1983 гг., когда произошло 7 событий с  $M=4.5 - 5.3$  (рисунок 3). Отметим, что в рассматриваемом районе за указанный период времени не зарегистрировано ни одного глубокофокусного землетрясения ( $h=34 - 70$  км,  $M\geq 3.5$ ).

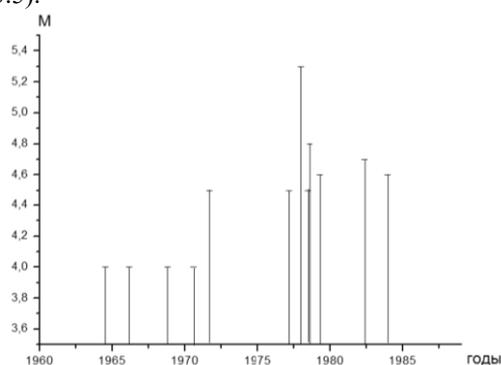
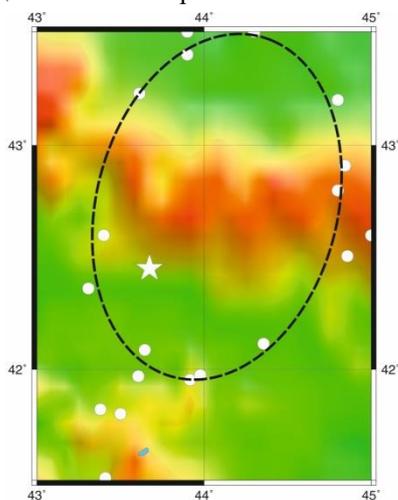


Рисунок 3. Зона очага Спитакского землетрясения. Зависимость магнитуд событий в области кольцевой структуры от времени

На рисунке 4 представлены данные о сейсмичности в области Северного Кавказа, ограниченной координатами  $41.5 - 43.5^\circ N$ ,  $43.0 - 45.0^\circ E$ , за период с 01.01.1964 по 28.04.1991 гг. Здесь перед Рачинским землетрясением четко проявилась крупная кольцевая структура ( $M_{п1}=4.0$ ,  $L\sim 180$  км), вытянутая в субмеридиональном направлении.



Обозначения – на рисунке 2

Рисунок 4. Неглубокая сейсмичность в зоне очага Рачинского землетрясения и ее окрестностях

Кольцо сейсмичности пересекает весь Большой Кавказ; внутрь него попадает одна из высочайших вершин этой горной системы – г. Казбек. Наибольшие магнитуды соответствуют событиям 1976 и 1978 гг. ( $M=4.8$ ). Эпицентр главного землетрясения находится внутри кольца сейсмичности, на расстоянии около 20 км от его границы. Из рисунка 5 следует, что наибольшая скорость СТД наблюдалась в 1976 - 1987 гг. В данном случае зарегистрировано только одно относительно глубокофокусное событие с  $M\geq 3.5$  ( $h=46$  км), так что заведомо не сформировалось глубокое кольцо в диапазоне  $h=34 - 70$  км.

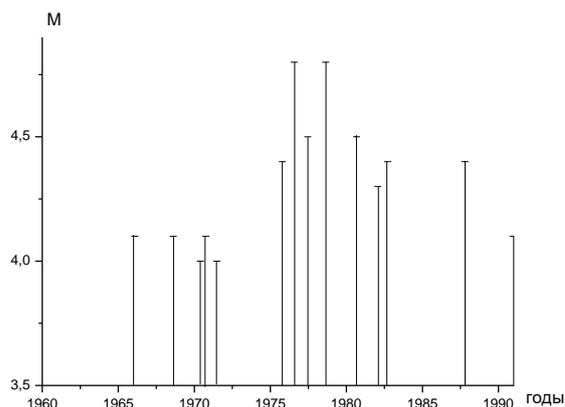
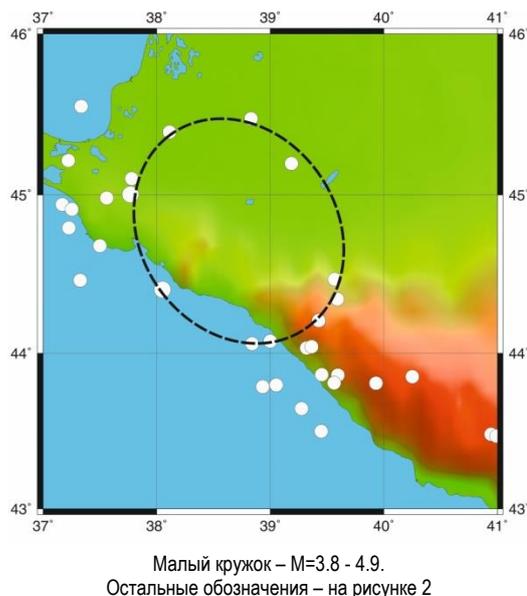


Рисунок 5. Зона очага Рачинского землетрясения. Зависимость магнитуд событий в области кольцевой структуры от времени

Рисунок 6 иллюстрирует характеристики сейсмичности на западной окраине Большого Кавказа. В этой области в период с 01.01.1973 по 01.01.2015 гг. образовалась мелкая кольцевая структура, ориентированная в направлении на северо-северо-запад ( $M_{п1}=3.8$ ,  $L\sim 170$  км).

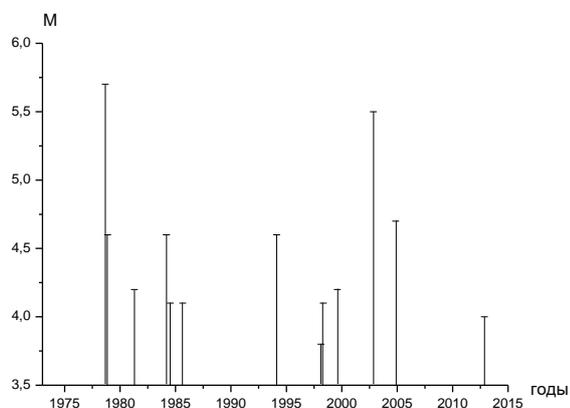


Малый кружок –  $M=3.8 - 4.9$ .  
Остальные обозначения – на рисунке 2

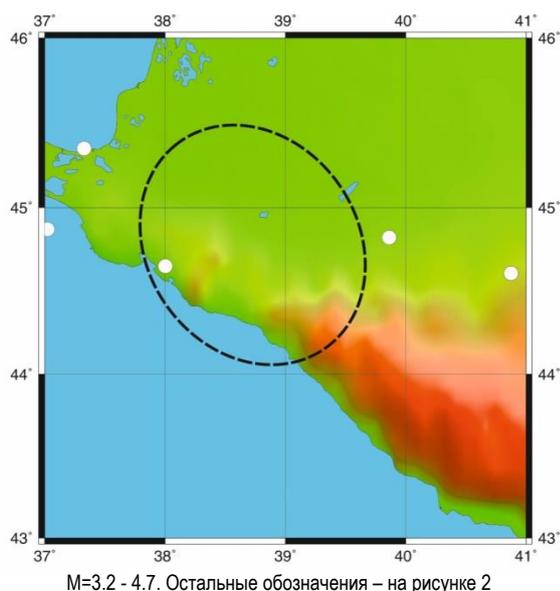
Рисунок 6. Неглубокая сейсмичность на западной окраине Большого Кавказа

**АНАЛИЗ КОЛЬЦЕВЫХ СТРУКТУР СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ ЗАПАДНОГО КАВКАЗА:  
ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

Большая часть кольца сейсмичности проходит по континентальной области (в Краснодарском крае), а южный край приходится на северную границу Черного моря. Северная часть кольца сейсмичности находится в Индоло-Кубанском краевом прогибе, а юго-западная – граничит с Туапсинским прогибом. Кольцевая структура на юго-востоке пересекает западный фланг Большого Кавказа (между 44.0 и 44.5° N, 39.1 и 39.6° E). Текущее время ее формирования Тп – около 37 лет. Самая большая магнитуда в области кольца сейсмичности соответствует событию 1978 г. (M=5.7). Из рисунка 7 видно, что максимальные скорости СТД имели место в 1978 - 1985 и 2002 - 2004 гг. На рисунке 8 показаны эпицентры глубоких землетрясений. В данном случае зарегистрировано только 5 таких событий (M=3.2 - 4.7, h=35 - 52 км), 4 из которых формируют субширотную полосу, пересекающую центральную часть мелкого кольца.

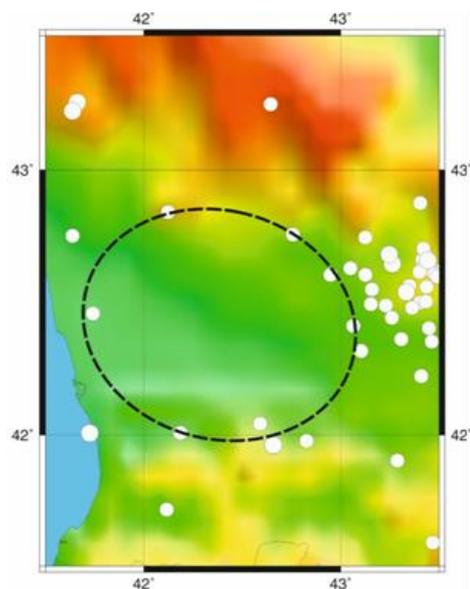


*Рисунок 7. Западная окраина Большого Кавказа  
Зависимость магнитуд событий в области кольцевой  
структуры от времени*



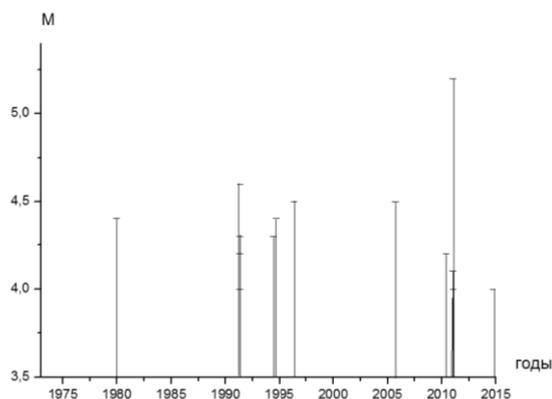
*Рисунок 8. Глубокая сейсмичность на западной окраине  
Большого Кавказа*

На рисунке 9 представлены характеристики сейсмичности к западу от очага Рачинского землетрясения. Здесь к 01.01.2015 г. сформировалась кольцевая структура, вытянутая в субширотном направлении. Кольцо сейсмичности расположено между Эгрисским хр. Большого Кавказа и Месхетским хр. Малого Кавказа; внутри него находится большая часть Рионского прогиба. Начало формирования кольцевой структуры относится к 1979 г., текущее время ее образования составляет около 36 лет. Наибольшая магнитуда (Mmax=5.2) соответствует землетрясению 2011 г., максимальные скорости СТД наблюдались в 2006 - 2014 гг. (рисунки 10).



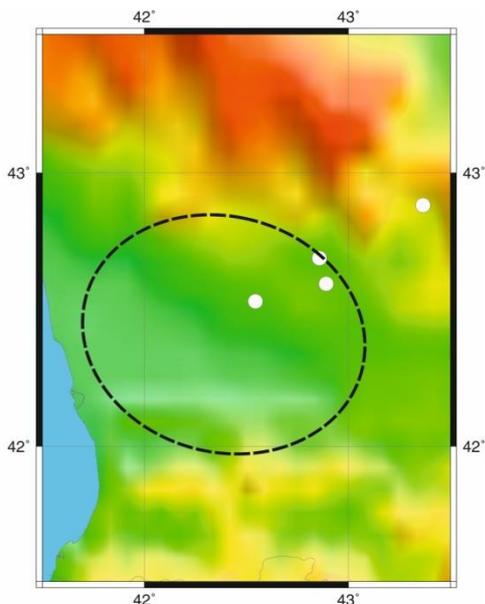
Обозначения – на рисунке 2

*Рисунок 9. Неглубокая сейсмичность к западу от очага  
Рачинского землетрясения*



*Рисунок 10. Зависимость магнитуд событий от времени  
в области кольцевой структуры к западу от очага  
Рачинского землетрясения*

Из рисунка 11 следует, что эпицентры глубоких событий в данном случае образуют полосу северо-восточного простирания (M=3.4 - 4.4, h=34 - 38 км), пересекающую мелкое кольцо на северо-востоке.



M=3.4 - 4.4. Остальные обозначения – на рисунке 2

Рисунок 11. Глубокая сейсмичность к западу от очага Рачинского землетрясения

В [4] получены корреляционные зависимости величин  $L$  и  $M_{п1}$  от магнитуды главных событий для внутриконтинентальных землетрясений с различными типами подвижек в очаге. Для механизмов типа взброса и взбрососдвига, которые преобладают у сильных событий в районе Кавказа [7, 10, 11], получены следующие зависимости:

$$\lg L(\text{км}) = -1.11 + 0.45M_w, \quad r=0.85. \quad (1)$$

$$M_{п1} = -0.92 + 0.73M_w, \quad r=0.77, \quad (2)$$

где  $r$  – коэффициент корреляции.

По формулам (1) – (2) были оценены магнитуды сильных землетрясений, которые могут соответствовать описанным выше кольцевым структурам (таблица 2).

Таблица 2. Оценки величин  $M_w$  по параметрам кольцевых структур

Область	$L$ , км	$M_{п1}$	$T_p$ , лет	$M_w(L)$	$M_w(M_{п1})$	$M_w$
40.5-42.0° N 43.5-44.5° E	50	4.0	27	6.2	6.7	6.5±0.3
41.5-43.5° N 43.0-45.0° E	180	4.0	23	7.5	6.7	7.1±0.4
43.0-46.0° N 37.5-40.0° E	170	3.8	37*	7.4	6.5	7.0±0.5
41.5-43.5° N 41.5-43.5° E	130	4.0	36*	7.2	6.7	7.0±0.3

Примечание \* – для этих областей указаны текущие величины  $T_p$

Из таблицы 2 следует, что по параметрам колец сейсмичности, сформировавшихся перед Спитакским и Рачинским землетрясениями, можно было спрогнозировать подготовку событий с  $M_w=6.5±0.3$  и  $7.1±0.4$ , соответственно. Полученные оценки достаточно близки к реальным магнитудам этих событий.

Двум другим кольцевым структурам соответствуют близкие средние величины  $M_w$  для событий, которые могут готовиться в этих областях. Отметим, что для всех колец сейсмичности, сформировавшихся в районе Большого Кавказа, получены существенно более низкие величины  $M_w(M_{п1})$  по сравнению с  $M_w(L)$ . В то же время для кольца сейсмичности, сформировавшегося перед Спитакским землетрясением, величина  $M_w(M_{п1})$  значительно выше, чем  $M_w(L)$ .

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют о том, что в районе Западного Кавказа, как и во многих других континентальных районах [1 - 4], перед сильными землетрясениями формируются неглубокие кольцевые структуры сейсмичности. Вместе с тем, здесь не проявляются глубокие кольцевые структуры (на глубинах 34 - 70 км), которые образуются перед большинством сильных и сильнейших землетрясений в зонах субдукции [9, 12 - 14]. В [1, 13] показано, что кольцевые структуры сейсмичности коррелируются с аномалиями высокого поглощения короткопериодных  $S$ -волн в литосфере, в том числе в районах, где отсутствует современный вулканизм, что говорит о связи таких структур с относительно высоким содержанием глубинных флюидов. Можно полагать, что кольца сейсмичности служат отражением процессов самоорганизации геологических систем [15], в конечном счете ведущих к уменьшению потенциальной энергии Земли в результате подъема легкой жидкой фазы. Отсутствие глубоких колец сейсмичности в большинстве континентальных районов, скорее всего, связано со значительно меньшим содержанием свободных флюидов в литосфере континентов по сравнению с зонами субдукции [16].

Проведенный анализ показывает, что перед двумя печально известными кавказскими землетрясениями, которые оказались совершенно неожиданными для сейсмологов, сформировались неглубокие кольцевые структуры. Существенно, что оценки магнитуд этих событий, полученные по параметрам колец сейсмичности, близки к реальным величинам для Спитакского и Рачинского землетрясений. Кроме того, длительности их формирования хорошо согласуются со средними величинами, полученными для внутриконтинентальных землетрясений с механизмами типа взброса и взбрососдвига ( $T_p \sim 24 \pm 5$  лет [3]). В связи с этим есть основания полагать, что своевременное использование информации о кольцевой активности могло бы быть полезным в целях среднесрочного прогноза этих сильных сейсмических событий.

Важно подчеркнуть, что нами выделены четко выраженные кольцевые структуры в двух областях Западного Кавказа, где в историческое время не зарегистрировано сильных землетрясений с  $M \geq 6.0$  [8]. Текущая длительность их формирования близка к максимальным величинам, известным в настоящее

время (~40 лет [4]). В связи с этим в указанных областях необходимо проводить постоянный мониторинг геодинамических процессов геофизическими и геохимическими методами с целью среднесрочного прогноза возможных сильных землетрясений. Особую опасность будет представлять событие, которое может произойти на западном фланге Большого Кавказа, в связи с высокой плотностью населения и близостью нескольких крупных городов (Краснодара, Новороссийска, Сочи и др.).

Выделенные нами неглубокие кольца сейсмичности имеют относительно большие размеры, поэтому для уточнения положения очагов возможных сильных землетрясений необходимо проводить дополнительные исследования. Вместе с тем, по аналогии с зонами субдукции, где эпицентры сильных и сильнейших землетрясений, как правило, располагаются вблизи точек пересечения или наибольшего сближения мелких и глубоких кольцевых структур сейсмичности [9, 12 - 14], можно предположить, что в районе Западного Кавказа эпицентры таких событий,

вероятно, будут находиться в областях пересечения мелких колец с полосами, сформированными эпицентрами глубоких землетрясений (как отмечено в [9, 12 - 14], данный эффект связан с наибольшей мощностью двухфазного слоя с заметной долей флюидов, вследствие чего на кровле такого слоя наблюдается максимальная концентрация напряжений [17]). Кроме того, по аналогии с положением очагов сильных землетрясений, произошедших в XX веке (рисунок 1), можно предполагать, что эпицентры возможных событий должны быть приурочены к горным областям. Учитывая эти данные, можно сделать вывод, что наиболее вероятное положение двух очагов возможных сильных землетрясений в рассматриваемом районе – это соответственно северный (в Краснодарском крае) и южный склон Большого Кавказа. Для уточнения положения возможных очаговых зон целесообразно привлечение палеосейсмических данных (в том числе получаемых методом тренчинга [6, 7]).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Копничев, Ю.Ф. О корреляции характеристик сейсмичности и поля поглощения S-волн в районах кольцевых структур, формирующихся перед сильными землетрясениями / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вулканология и сейсмология, 2010. – № 6. – С. 34 – 51.
2. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения S-волн и кольцевые структуры сейсмичности в районе Байкальской рифтовой зоны / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2012. – Вып. 4. – С. 33 – 41.
3. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности, формирующиеся в континентальных районах перед сильными землетрясениями с различными механизмами очагов / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Геофизические исследования, 2013. – Т. 14, № 1. – С. 5 – 15.
4. Копничев, Ю.Ф. Характеристики поля поглощения S-волн в очаговых зонах двух сильных землетрясений Южной Азии и их связь с сейсмичностью / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2014. – Вып. 1. – С. 79 – 85.
5. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности в районах Центрального Тянь-Шаня и Джунгарии: возможная подготовка сильных землетрясений / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вулканология и сейсмология, 2014. – № 3. – С. 65 – 73.
6. Рогожин, Е.А. соотношении проявлений вулканизма и землетрясений на Северном Кавказе / Е.А. Рогожин [и др.] // Физика Земли, 2005. – № 3. – С. 33 – 46.
7. Рогожин, Е.А. Тектоника очаговых зон сильных землетрясений Северной Евразии конца XX столетия // Рос. журнал наук о Земле, 2000. – Т. 2. – № 1.
8. Кондорская, Н.В. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин (ред.). - М.: Наука, 1977. – 535 с.
9. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности и землетрясение 11.03.2011 г. (Mw=9.0) в районе северо-восточной Японии / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // ДАН, 2011. – Т. 440, № 2. – С. 246 – 249.
10. Арефьев, С.С. Рачинское землетрясение 1991 г.: результаты сейсмологических наблюдений / С.С.Арефьев [и др.] // Физика Земли, 1993. – № 3. – С. 53 - 63.
11. Белоусов, Т.П. Рачинское землетрясение 1991 г. и его проявление в рельефе Большого Кавказа / Т.П. Белоусов // М.: Светоч Плюс, 2009. – 208 с.
12. Копничев, Ю.Ф. Характеристики кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в районе Суматры / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // ДАН, 2009. – Т. 429, № 1. – С. 106 – 109.
13. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных S-волн в районе очага землетрясения Мауле (Чили, 27.02.2010, Mw=8.8) и их связь с сейсмичностью и вулканизмом/ Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Геофизические исследования, 2011. – Т.12, № 3. – С.22 - 33.
14. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности в районе Северного Чили и успешный прогноз места и магнитуды землетрясения Икике 01.04.2014 г. (Mw=8.2) / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2015. – Вып. 4. – С.153 – 159.
15. Летников, Ф.А. Синергетика геологических систем / Ф.А. Летников // Новосибирск: Наука, 1992. – 229 с.
16. Gold, T. Fluid ascent through the solid lithosphere and its relation to earthquakes / Gold T., Soter S. // Pure Appl. Geophys, 1984/1985. – V. 122. – P. 492 – 530.
17. Yamazaki, T. Double seismic zone and dehydration embrittlement of the subducting slab / T.Yamazaki, T.Seno // J. Geophys. Res., 2003. – V. 108, N B4. doi: 10/1029/2002JB001918.

**БАТЫС КАВКАЗДЫҢ АУДАНЫНДАҒЫ СЕЙСМИКАЛЫҚТЫҢ АЙНАЛМАЛЫ ҚҰЛЫМДАРЫН  
ТАЛДАУ: БОЛАТЫН ҚАТТЫ ЖЕРСІЛІНУЛЕРДІ ДАЙЫНДАУ**

<sup>1)</sup> Ю.Ф. Копничев, <sup>2)</sup> И.Н. Соколова

<sup>1)</sup> *РФА О.Ю. Шмидт атындағы Жер физикасы институты, Москва, Ресей*

<sup>2)</sup> *Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

Батыс Кавказдың ауданында, 1961 жылдан бастап сейсмикалықтың кейбір сипаттамалары қарастырылады. Екі қатты жерсілкіністердің алдында – Спитактікінің 1988ж.12.07-сіндегі ( $M_w=6.8$ ) және Рачинскінің 1991ж.05.29-ындағы ( $M_w=7.0$ ) 0-33 км. тереңдікте сейсмикалықтың айналмалы құрылымдары қалыптасқаны белгілі болды. Сейсмикалықтың айналымдары магнитуданың ( $M_p$ ) шекті көрсеткіштерімен және үлкен остің ұзындықтарымен сипатталады. Бұрын Батыс Кавказдың ауданында басымды орын алатын, ығыстыру және ығыстырып жылжыту түріндегі механизмдері бар құрлықаралық жерсілкіністері үшін басты оқиғалардың магнитудаларынан  $M_w$ ,  $M_p$  и  $lgL$  көлемдерінің корреляциялық тәуелділіктері алынған болатын. Осы тәуелділіктердің негізінде айналмалы құрылымдардың аумақтарында дайындалып жатуы мүмкін қатты оқиғалардың магнитудаларының бағалауы жүргізілді:  $M_w=6.5\pm 0.3$  және  $M_w=7.1\pm 0.4$ , осыған сәйкес Спитак және Рачинск аймақтарының желсілкіністеріне. Осы көлемдер көрсетілген оқиғалардың нақты магнитудаларына едәуір жақын. Үлкен Кавказдың батыс төңірегінде және Батыс Грузия аумағында қалыптасып жатқан үлкен айналмалы құрылымдар белгіленді, бұл жерлерде аспаптық және тарихи деректер бойынша қатты жерсілкіністер болмағандығы белгілі. Осы құрылымдардың сипаттамалары бойынша, көрсетілген аумақтарда болатын қатты жерсілкіністердің магнитудалары бағаланды:  $M_w=7.0\pm 0.5$  және  $M_w=6.9\pm 0.2$ . Үлкен Кавказдың батыстағы шеткі төңірегінде дайындалып жатылуы мүмкін қатты сейсмикалық оқиға, ерекше қауіп болуы мүмкін, бұған себеп осы жерде халықтың тығыз орналасуы және осы жерге Краснодар, Новороссийск, Сочи және т.б. ірі қалалардың жақын орналасуы. Айналмалы құрылымдардың қалыптасуы, тереңдегі флюидтардың көшуіне байланысты, геологиялық жүйелердің өзін-өзі ұымдастыру үдерістерінің салдарынан болды деген болжам бар.

**ANALYSIS OF RING-SHAPED SEISMICITY STRUCTURES IN THE REGION OF WESTERN CAUCASUS:  
POSSIBLE PREPARATION FOR LARGE EARTHQUAKES**

<sup>1)</sup> Yu.F. Kopnichev, <sup>2)</sup> I.N. Sokolova

<sup>1)</sup> *Institute of the Earth Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2)</sup> *Institute of Geophysical Research Kurchatov, Kazakhstan*

We have been studying some seismicity characteristics in the region of Western Caucasus since 1961. It was established that ring-shaped seismicity structures have been formed within depth range of 0-33 km prior to large earthquakes – Spitak of 07.12.1988 ( $M_w=6.8$ ) and Racha of 29.05.1991 ( $M_w=7.0$ ). Seismicity rings are characterized by threshold magnitude value ( $M_t$ ) and big axis length ( $L$ ). Earlier we have obtained correlation dependences of  $M_t$  and  $lgL$  values on magnitudes of main events  $M_w$  for intracontinental earthquakes with mechanisms of reverse and oblique-reverse faulting, prevailing in the region of Western Caucasus. Using these dependences we estimated magnitudes of large events which could be prepared in the areas of ring structures:  $M_w=6.5\pm 0.3$  and  $M_w=7.1\pm 0.4$  for zones of the Spitak and Racha earthquakes respectively. These values are close enough to real magnitudes of the events mentioned. Big ring structures were identified at western outskirts of Great Caucasus and in a region of West Georgia, where large earthquakes are not known according to instrumental and historical data. We estimated magnitudes of possible large earthquakes by characteristics of these structures:  $M_w=7.0\pm 0.5$  and  $M_w=7.0\pm 0.3$  in the regions mentioned respectively. Large seismic event, which probably is prepared at the westernmost part of the Great Caucasus, can represent a special danger due to great density of population and nearness of a few big cities: Krasnodar, Novorossiysk, Sochi etc. It is supposed that ring structures formation is a consequence of geologic system self-organization, connected with deep-seated fluids migration.

УДК 550.344 + 550.34

## НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ S-ВОЛН И КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В ПАМИРО-ГИНДУКУШСКОМ РЕГИОНЕ: ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНЫХ КОРОВЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

<sup>1)</sup> Копничев Ю.Ф., <sup>2)</sup> Соколова И.Н.

<sup>1)</sup> *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия*

<sup>2)</sup> *Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан*

Выполнено картирование поля поглощения короткопериодных поперечных волн в литосфере Памиро-Гиндукушского региона. Использован метод, основанный на анализе отношений амплитуд волн  $S_n$  и  $P_n$ . Выделены области высокого поглощения в районах Афгано-Таджикской впадины, центрального Гиндукуша и Северного Памира. В этих районах, начиная с 1973 г. сформировались кольцевые структуры сейсмичности в диапазонах глубин 0 - 33 и 34 - 70 км. Такие структуры обычно формируются перед сильными землетрясениями в зонах субдукции. По характеристикам кольцевых структур оценены магнитуды готовящихся сильных землетрясений в указанных районах. По аналогии с зонами субдукции предполагается, что кольцевые структуры образуются в результате миграции глубинных флюидов.

В последние годы установлено, что перед многими сильными внутриконтинентальными землетрясениями в литосфере формируются зоны высокого содержания флюидов [1 - 3]. Таким зонам соответствуют области сильного поглощения короткопериодных поперечных волн в нижней коре и верхах мантии [1 - 6]; кроме того, с ними, как правило, связано формирование кольцевых структур сейсмичности [2, 3, 7, 8]. В связи с этим данные о поглощении S-волн, а также о кольцах сейсмичности могут быть использованы для выделения областей подготовки сильных коровых землетрясений. Исследования были выполнены, в частности, для районов Тянь-Шаня [4, 7] и Прибайкалья [9, 10]. Существенно, что одновременное использование данных о характеристиках поля поглощения и кольцевых структурах позволяет более надежно выделять области возможной подготовки сильных коровых землетрясений, поскольку при анализе одних характеристик сейсмичности возможно оконтуривание "ложных" колец сейсмичности, так же как и ложных зон затишья, не связанных с очагами готовящихся сильных сейсмических событий. Кроме того, по параметрам кольцевых структур можно оценивать магнитуды готовящихся сильных землетрясений, основываясь на данных, полученных в работах [2, 11].

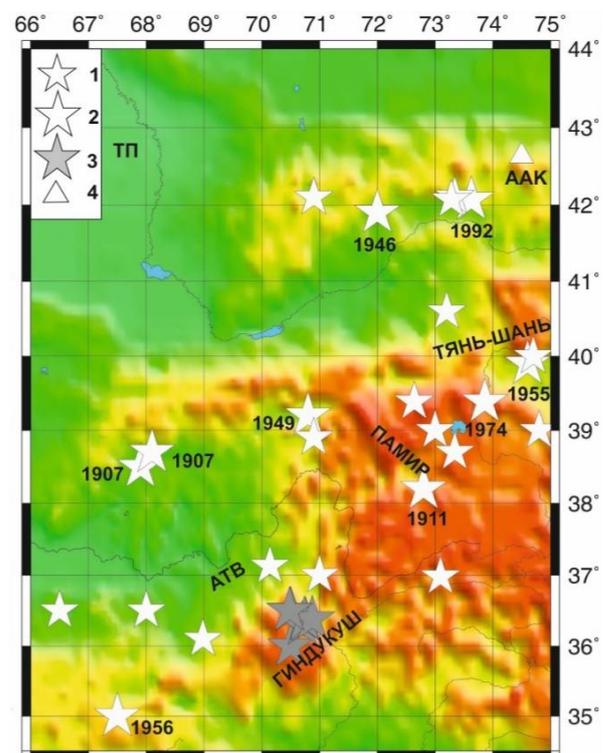
Ниже описываются результаты анализа характеристик полей поглощения S-волн и сейсмичности в регионе Памиро-Гиндукуша.

### ИСТОРИЧЕСКАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ

На рисунке 1 показаны эпицентры сильных коровых землетрясений ( $M \geq 6.5$ ), произошедших в рассматриваемом регионе в 1900 - 2014 гг. Из рисунка следует, что за более чем 110-летний период в районах Памира и Гиндукуша произошло всего три сильных события с  $M \geq 7.0$  (Сарезское землетрясение 1911 г. с  $M=7.4$ , Афганское 1956 г. с  $M=7.2$  и Маркансуйское 1974 г. с  $M=7.3$ ). Еще шесть землетрясений такой же силы, отмеченные на карте, относятся

к районам Западного и Центрального Тянь-Шаня. Существенно, что уровень коровой сейсмичности в регионе Памиро-Гиндукуша значительно ниже, чем в районе Центрального Тянь-Шаня [5].

Следует отметить, что в рассматриваемом регионе находится крупнейшая в Центральной Азии зона глубокофокусной сейсмичности, где достаточно часто происходят сильные землетрясения с  $M \geq 7.0$  на глубинах  $\sim 100 - 300$  км (рисунк 1) [12].



ТП – Туранская плита; АТВ – Афгано-Таджикская впадина. Эпицентры сильных землетрясений (с 1900 г.): 1 –  $M=6.5 - 6.9$ ; 2 –  $M \geq 7.0$  (указаны годы этих событий); 3 – эпицентры сильных глубокофокусных землетрясений ( $M \geq 7.0$ ); 4 – сейсмическая станция

Рисунк 1. Карта района исследований

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

**Картирование поля поглощения** проводилось путем анализа отношений максимальных амплитуд в волнах Sn и Pn (параметра  $I_g(A_{Sn}/A_{Pn})$ , который мы для краткости будем обозначать как Sn/Pn). Ранее было установлено, что группа Sn формируется поперечными волнами, отраженными от многочисленных субгоризонтальных границ в верхней мантии [13]. Путем анализа записей S-коды близких землетрясений показано, что в сейсмически активных районах Центральной Азии наиболее сильное поглощение короткопериодных S-волн наблюдается, как правило, в нижней коре и верхах мантии, в слое, расположенном на глубинах ~30 - 70 км [14]. Оценки показывают, что для источников, расположенных на нулевой глубине, снос лучей в этом слое для группы Sn составляет ~30 - 100 км. В этом случае основное поглощение S-волн приходится на самые верхи мантии. Параметр Sn/Pn использовался для нормировки, так как волны Sn и Pn распространяются близкими трассами. Для учета вариаций диаграммы направленности излучения в очагах проводилось осреднение величин Sn/Pn в небольших областях с линейными размерами, как правило, несколько десятков км. Поскольку поглощение очень сильно зависит от частоты, при анализе записей использовалась узкополосная частотная фильтрация (фильтр с центральной частотой 1.25 Гц и полосой пропускания 2/3 октавы [15]).

**Выделение кольцевых структур сейсмичности.** Анализ характеристик сейсмичности проведен, как и ранее [2, 3, 7, 8, 11], для двух диапазонов глубин: 0 - 33 и 34 - 70 км. Использовались каталоги землетрясений NEIC за период с 01.01.1973 по 01.10.2014 гг. Для выделения кольцевых структур обработаны данные о событиях, которые произошли в районе, ограниченном координатами 35.5° - 39.5° N, 68° - 75° E. Кольца сейсмичности характеризовались пороговыми значениями магнитуд ( $M_{p1}$  и  $M_{p2}$ ), а также длинами больших осей ( $L$  и  $l$ ), соответственно для верхнего и нижнего диапазонов глубин.

**АНАЛИЗ ДАННЫХ**

**Картирование поля поглощения.** На рисунке 2-а приведена зависимость параметра Sn/Pn от эпицентрального расстояния  $\Delta$ . Несмотря на осреднение данных, наблюдается очень большой разброс величин Sn/Pn (от 0.79 до -0.33). В целом значения Sn/Pn уменьшаются с расстоянием, как и для подавляющего большинства других континентальных районов [4, 9], уравнение линейной регрессии имеет вид:

$$Sn/Pn = 0.58 - 0.00053\Delta \text{ (км)} \quad (1)$$

На рисунке 2-б для сравнения приведены линии регрессии для аналогичных зависимостей, полученных в других районах Центральной Азии [9].

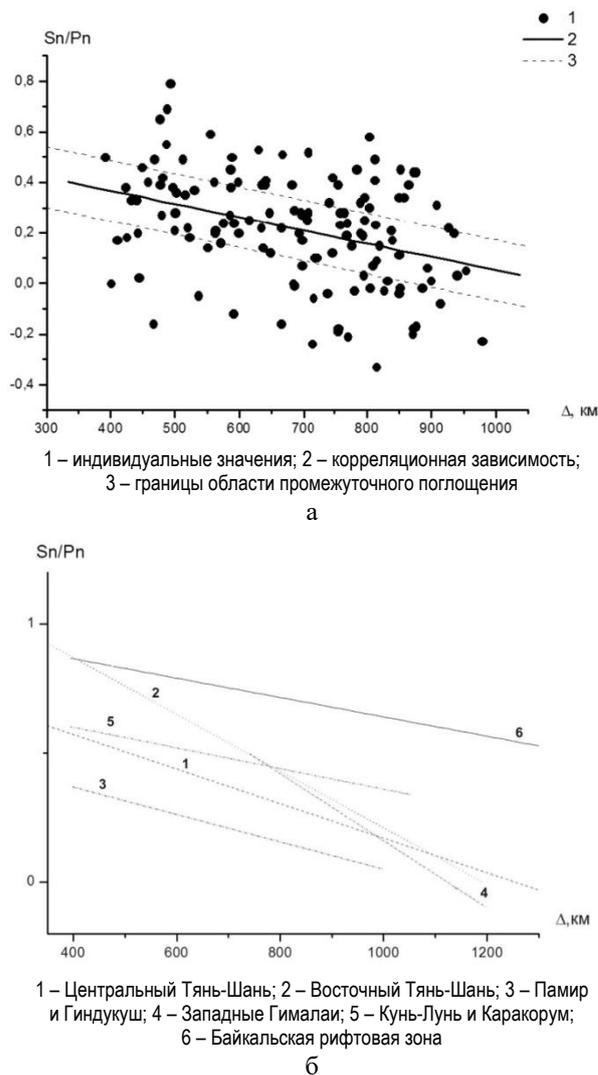
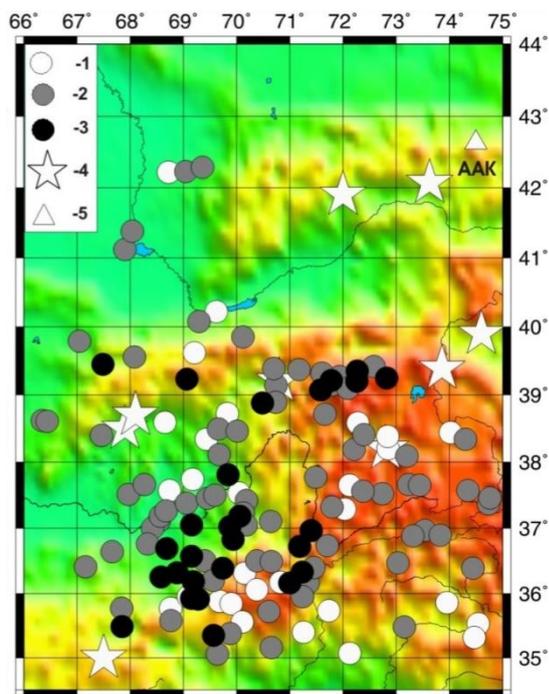


Рисунок 2. Корреляционные зависимости параметра Sn/Pn от эпицентрального расстояния для:  
а – Памиро-Гиндукушского региона;  
б – разных районов Центральной Азии

Видно, что в диапазоне расстояний 400 - 1000 км средний уровень величин Sn/Pn в Памиро-Гиндукушском регионе значительно ниже, чем в других районах. На рисунке 3 представлена карта поля поглощения S-волн в литосфере рассматриваемого региона [16].

На карте показаны значения параметра Sn/Pn с учетом поправки за эпицентрального расстояния (отклонения от средней зависимости (1)). Все значения параметра разбиты на три группы по уровню, соответствующему пониженному ( $\Delta Sn/Pn > 0.12$ ), промежуточному ( $-0.12 \leq \Delta Sn/Pn \leq 0.12$ ) и повышенному ( $\Delta Sn/Pn < -0.12$ ) поглощению. Из рисунка 3 следует, что поле поглощения короткопериодных поперечных волн в исследуемом регионе характеризуется большой неоднородностью. Наиболее сильное поглощение наблюдается в южной части региона.



Поглощение: 1 – пониженное; 2 – промежуточное; 3 – повышенное;  
4 – эпицентры сильных коровых землетрясений ( $M \geq 7.0$ );  
5 – сейсмическая станция

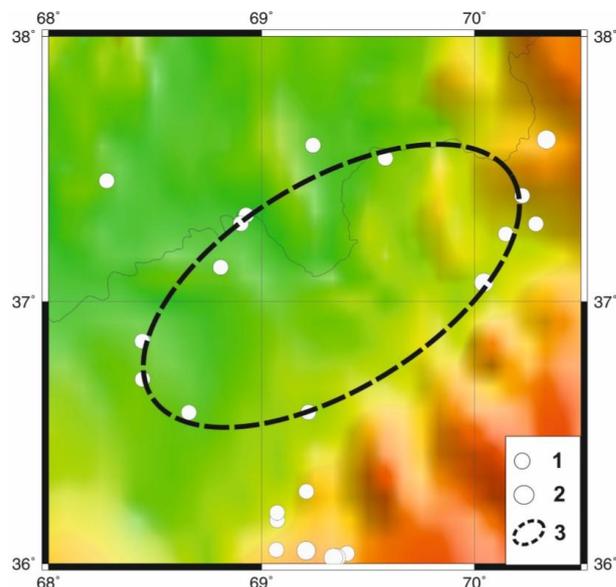
Рисунок 3. Неоднородности поля поглощения  
в изучаемом регионе

Выделяется яркая аномалия низких величин  $S_n/P_n$  в районе Афгано-Таджикской впадины, примыкающей к гиндукушской зоне глубокофокусной сейсмичности. Узкая область высокого поглощения, простирающаяся в северо-северо-восточном направлении, наблюдается на восточной границе гиндукушской зоны. Еще одно “пятно” сильного поглощения, ориентированное в субширотном направлении, выделено на границе Памира и Тянь-Шаня (к югу от Алайского хр.). Самая большая область промежуточного поглощения находится в районе Южного Памира и к югу от него.

Для сравнения рассмотрены характеристики поля поглощения в районах Западного Тянь-Шаня и востока Туранской плиты (по небольшому числу данных). Из рисунка 3 видно, что поглощение здесь относительно слабое, выделяются только два маленьких пятна низких величин  $S_n/P_n$ .

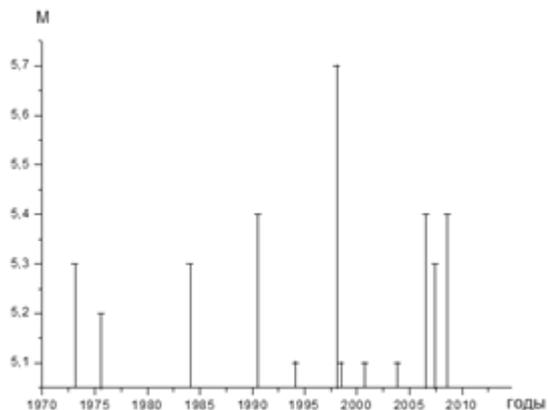
**Кольцевые структуры сейсмичности.** Исходя из полученных данных, рассмотрены характеристики сейсмичности в относительно больших областях высокого поглощения. На рисунке 4-а представлены данные о сейсмичности в районе Афгано-Таджикской впадины (в диапазоне глубин 0 - 33 км). Четко выделяется кольцевая структура с пороговым значением  $M_{p1}=5.1$  и длиной большой оси  $L \sim 180$  км, вытянутая в северо-восточном направлении, которая сформировалась в 1973 - 2008 гг. На рисунке 4-б показана зависимость магнитуд событий в области кольца сейсмичности от времени. Наблюдается су-

щественное увеличение скорости сеймотектонической деформации (СТД) в 1998 - 2008 гг., наибольшая магнитуда  $M_{max}$  равна 5.7.



Эпицентры землетрясений: 1 –  $M=5.1 - 5.5$ ; 2 –  $M > 5.5$ ;  
3 – мелкая кольцевая структура

а

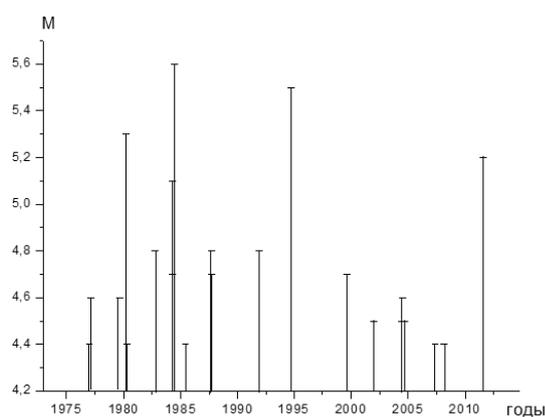
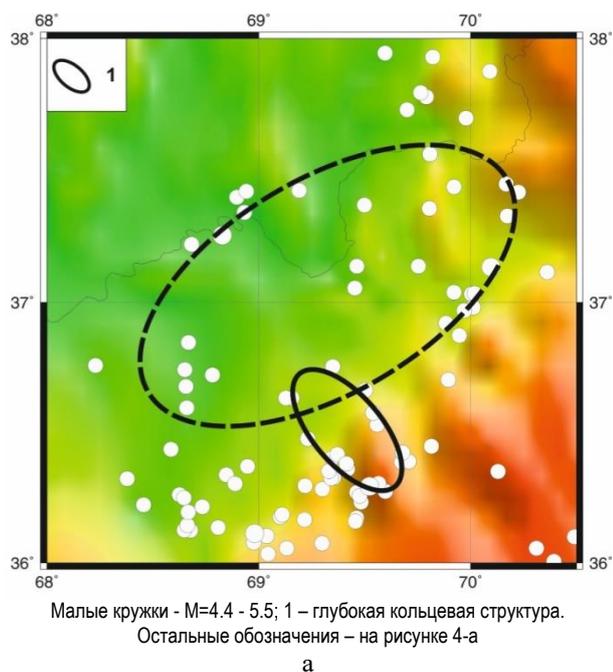


б

Рисунок 4. Район Афгано-Таджикской впадины: а – характеристика сейсмичности (глубины 0 - 33 км); б – зависимость магнитуд событий от времени в области мелкой кольцевой структуры

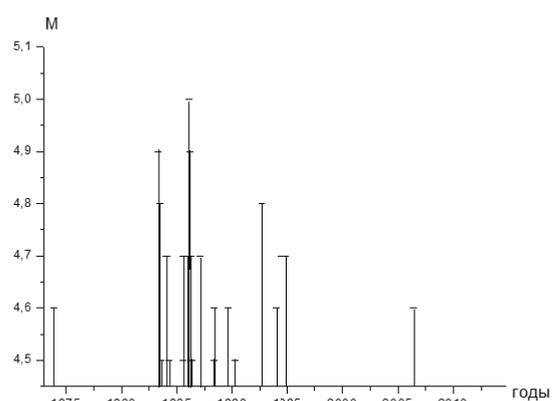
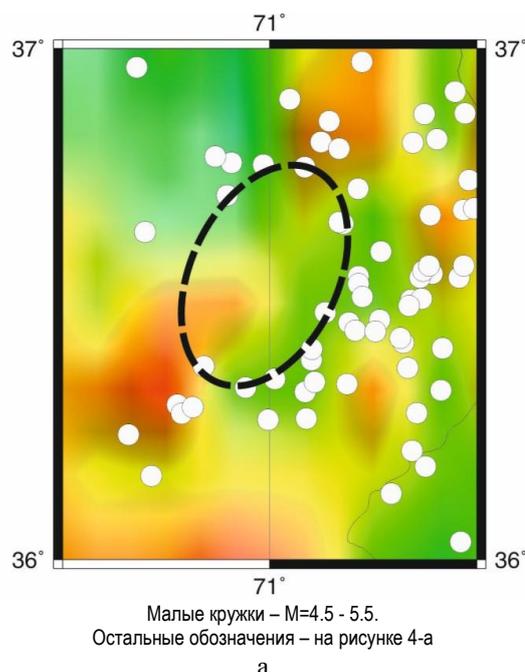
Рисунок 5-а иллюстрирует характеристики сейсмичности в нижнем диапазоне глубин. Здесь сформировалась кольцевая структура ( $M_{p2}=4.4$ ,  $l \sim 65$  км), ориентированная в северо-западном направлении. Из рисунка 5-б следует, что в данном случае наблюдался рост скорости СТД до 1984 г., далее она падала до 2004 г. Последнее относительно сильное событие ( $M=5.3$ ) произошло в 2011 г. Наибольшая магнитуда ( $M_{max}=6.4$ ) соответствует землетрясению 1984 г. Мелкое и глубокое кольца пересекаются в областях с координатами  $\sim 69.2^\circ$  и  $69.5^\circ$  E.

**НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ S-ВОЛН И КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ  
В ПАМИРО-ГИНДУКУШСКОМ РЕГИОНЕ: ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНЫХ КОРОВЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**



*Рисунок 5. Район Афгано-Таджикской впадины: а – характеристика сейсмичности (глубины 34 - 70 км); б – зависимость магнитуд событий от времени в области глубокой кольцевой структуры*

Данные о сейсмичности в районе центрального Гиндукуша представлены на рисунках 6-а и 6-б. Из рисунка 6а видно, что здесь в 1983 -1994 гг. сформировалось небольшое мелкое кольцо сейсмичности ( $M_{п1}=4.5$ ,  $L\sim 55$  км), вытянутое в субмеридиональном направлении. Полученная зависимость  $M(T)$  имеет асимметричный вид, наибольшая скорость СТД наблюдалась в 1983 - 1989 гг. (рисунок 6-б). Максимальная магнитуда  $M_{max}$  равна 5.0.



*Рисунок 6. Район центрального Гиндукуша: а – характеристики сейсмичности (глубины 0 - 33 км); б – зависимость магнитуд событий от времени в области мелкой кольцевой структуры*

В диапазоне глубин 34 - 70 км в 1974 - 2013 гг. также сформировалась кольцевая структура ( $M_{п2}=4.2$ ,  $l \sim 50$  км), ориентированная в направлении на северо-северо-запад (рисунок 7-а). В отличие от мелкого кольца, зависимость  $M(T)$  имеет U-образную форму, наибольшие скорости СТД наблюдались в 1982 - 1986 и 2001 - 2013 гг. (рисунок 7-б). Самые сильные землетрясения имели магнитуду 5.6 (в 1986 и 2005 гг.). Мелкое и глубокое кольца пересекаются в области между  $71.0^\circ$  и  $71.2^\circ$  Е.

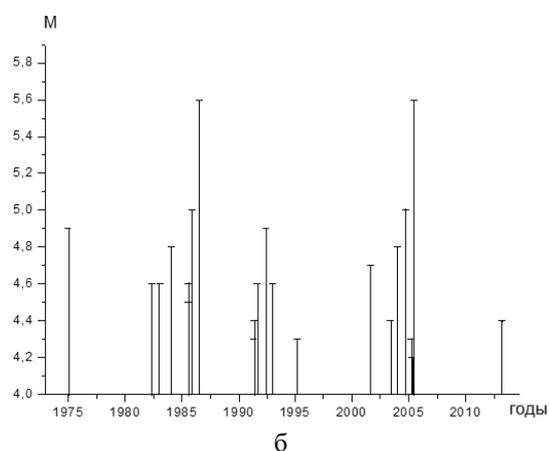
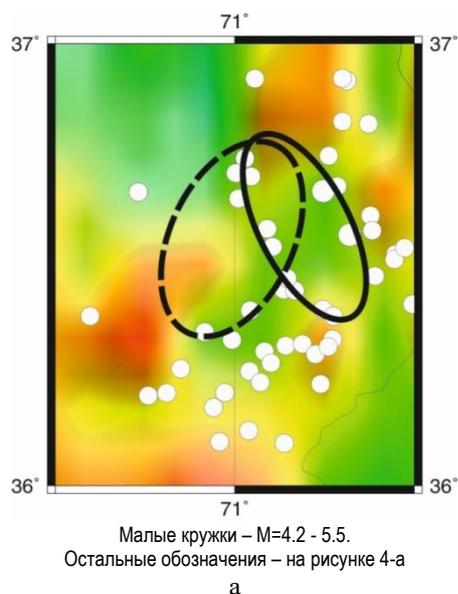


Рисунок 7. Район центрального Гиндукуша:  
а – характеристики сейсмичности (глубины 34 - 70 км);  
б – зависимость магнитуд событий от времени  
в области глубокой кольцевой структуры

На рисунке 8-а показаны характеристики сейсмичности в районе Северного Памира. Видно, что здесь в 1975-2011 гг. образовалось небольшое мелкое кольцо, вытянутое в запад-северо-западном направлении ( $M_{п1}=4.5$ ,  $L \sim 35$  км). Зависимость магнитуд событий от времени имеет U-образную форму, наибольшие скорости СТД зарегистрированы в 1975 - 1981 и 2003 - 2011 гг. (рисунок 8-б). Самое сильное землетрясение имело магнитуду 5.3 (1977 г.).

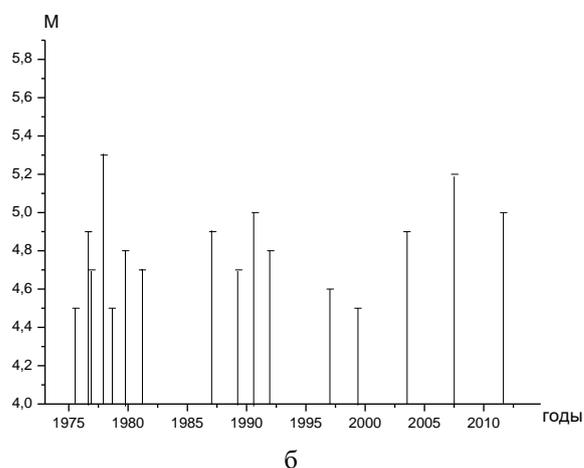
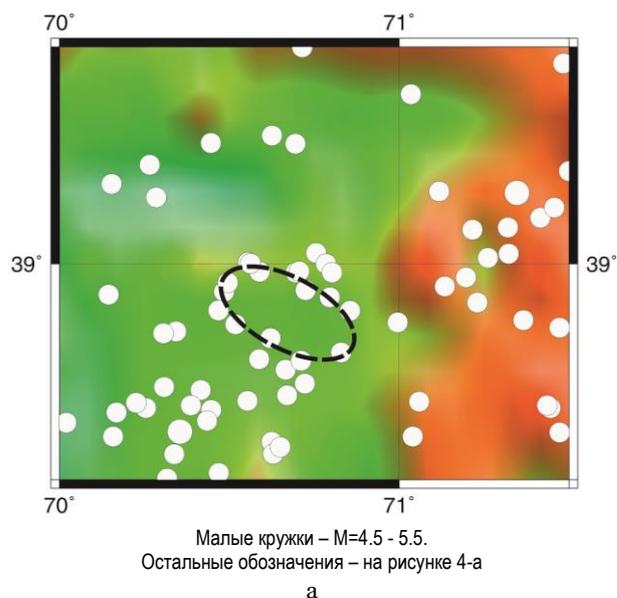


Рисунок 8. Район Северного Памира:  
а – характеристики сейсмичности (глубины 0 - 33 км);  
б – зависимость магнитуд событий от времени в  
области мелкой кольцевой структуры

На рисунке 9-а представлены характеристики сейсмичности в нижнем диапазоне глубин. Здесь в 1973-2011 гг. сформировалась малая кольцевая структура, ориентированная в северо-восточном направлении ( $M_{п2}=4.1$ ,  $l \sim 30$  км). Как и для мелкого кольца, график  $M(T)$  имеет U-образный вид, самые высокие скорости СТД наблюдались в 1976 - 1991 и 2006 - 2011 гг. (рисунок 9-б). Наибольшая магнитуда ( $M=5.3$ ) соответствует землетрясению, произошедшему в 1983 г. Кольца сейсмичности пересекаются в области между  $38.8^\circ$  и  $39.0^\circ$  N.

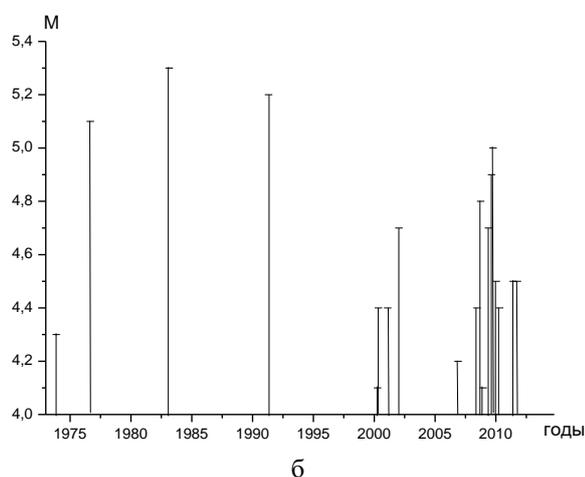
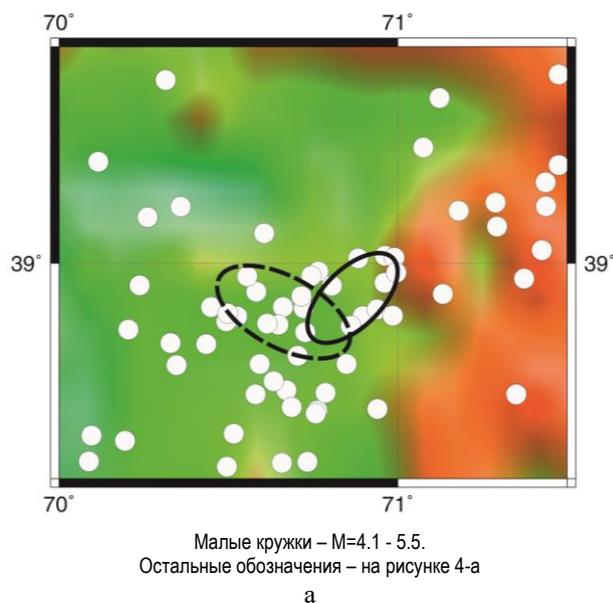


Рисунок 9. Район Северного Памира:  
а – характеристики сейсмичности (глубины 34 - 70 км);  
б – зависимость магнитуд событий от времени  
в области глубокой кольцевой структуры

Оценки магнитуд возможных сильных землетрясений сделаны на основании результатов [8], в которой получены корреляционные зависимости параметров  $L$  и  $M_{p1}$  от магнитуды главных событий  $M_w$  для внутриконтинентальных землетрясений с различными типами подвижек в очагах. Для взбросов и взбрососдвигов, которые преобладают в рассматриваемом регионе [17], такие зависимости имеют вид:

$$\lg L \text{ (км)} = -1.13 + 0.45 M_w, r=0.85 \quad (2)$$

$$M_{p1} = -0.92 + 0.73 M_w, r=0.77, \quad (3)$$

где  $r$  – коэффициент корреляции.

По формулам (2) и (3) получены следующие оценки величин  $M_w$  (таблица 1):

Таблица. Оценки величин  $M_w$  для возможных сильных землетрясений в регионе Памиро-Гиндукуша

° N	° E	$M_{p1}$	$L$ , км	$M_w(M_{p1})$	$M_w(L)$	$M_w$
36-38	68.0-70.5	5.1	180	8.2	7.5	$7.8 \pm 0.4$
36-37	70.5-71.5	4.5	55	7.4	6.4	$6.9 \pm 0.5$
38.5-39.0	70.5-71.5	4.5	35	7.4	5.9	$6.7 \pm 0.8$

Отметим, что во всех трех случаях получены значительно более высокие оценки  $M_w(M_{p1})$  по сравнению с  $M_w(L)$ .

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Из рисунка 2-б следует, что поглощение S-волн в верхах мантии Памира и Гиндукуша значительно сильнее, чем в других районах Центральной Азии. Это свидетельствует о большем содержании жидкой фазы в литосфере Памиро-Гиндукушского региона. Поскольку в этих районах отсутствуют проявления молодого вулканизма [18], можно сделать вывод, что сильное поглощение поперечных волн связано не с присутствием частично расплавленного материала, а с относительно высоким содержанием глубинных флюидов. Большее содержание жидкой фазы приводит к понижению вязкости литосферы и, следовательно, к увеличению скорости ее деформации, основной причиной которой служит смещение Индийской плиты на север относительно Азии [19]. Полученные данные позволяют объяснить, почему литосфера Памира и Гиндукуша деформируется как единое целое [20], в отличие от более вязкой литосферы Центрального Тянь-Шаня, деформация которой происходит в основном дискретно, в результате скольжения по разломным зонам [21].

Из рисунка 3 видно, что самые большие (по площади) области высокого поглощения расположены в районах Афгано-Таджикской впадины, Гиндукуша и Северного Памира. В этих районах нами выделены кольцевые структуры сейсмичности. В [2, 3] показано, что появление таких структур связано с миграцией глубинных флюидов. Формирование колец сейсмичности служит отражением процессов самоорганизации геологических систем [22], в конечном счете ведущих к уменьшению потенциальной энергии Земли.

В Памиро-Гиндукушском регионе, в отличие от большинства континентальных районов, выделены кольцевые структуры в двух диапазонах глубин: 0 - 33 и 34 - 70 км. Аналогичные данные получены для подавляющего большинства сильных и сильнейших землетрясений в различных зонах субдукции [3, 11, 23]. В то же время во внутриконтинентальных районах кольца сейсмичности формируются, как правило, только в верхнем диапазоне глубин [2, 7, 8]. Можно полагать, что это связано с большей мощностью двухфазного слоя в регионе Памиро-Гиндукуша и в зонах субдукции по сравнению с большинством континентальных районов. Отметим, что в зонах субдукции флюиды выделяются в результате де-

гидратации материала погружающихся океанических плит [24]. В последнее время получены указания на то, что аналогичные процессы могут наблюдаться и в верхах мантии в гиндукушской зоне глубокофокусной сейсмичности [12].

В [7, 11, 23] показано, что в зонах субдукции эпицентры сильных и сильнейших землетрясений, как правило, располагаются вблизи областей пересечения или наибольшего сближения мелких и глубоких колец сейсмичности. Скорее всего, это связано с наибольшей мощностью двухфазных слоев в таких областях, на кровле которых наблюдается концентрация напряжений (известно, что величина избыточных напряжений пропорциональна толщине насыщенного флюидами слоя [25]). Указанный эффект облегчает проведение исследований по среднесрочному прогнозу землетрясений в тех областях, где выделяются пары кольцевых структур [7, 11, 23], в том числе и в Памиро-Гиндукушском регионе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации поля поглощения поперечных волн в верхней мантии сейсмически активных и слабосейсмичных районов / Ю.Ф. Копничев, Д.Д. Гордиенко, И.Н. Соколова // Вулканология и сейсмология, 2009. – № 1. – С. 49 - 64.
2. Копничев, Ю.Ф. О корреляции характеристик сейсмичности и поля поглощения S-волн в районах кольцевых структур, формирующихся перед сильными землетрясениями / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вулканология и сейсмология, 2010 – № 6. – С. 34 -51.
3. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных S-волн в районе очага землетрясения Мауле (Чили, 27.02.2010, Mw=8.8) и их связь с сейсмичностью и вулканизмом / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Геофизические исследования, 2011. – Т.12. - № 3. – С. 22 - 33.
4. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных сейсмических волн в литосфере Центрального Тянь-Шаня / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вулканология и сейсмология, 2007. – № 5. – С. 54 - 70.
5. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных S-волн в литосфере Тянь-Шаня и Джунгарии и их связь с сейсмичностью / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // ДАН, 2010. – Т.433. - № 6. – С. 808 - 812.
6. Копничев, Ю.Ф. Картирование поля поглощения поперечных волн в земной коре и верхах мантии Алтая / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2010. – Вып. 1. – С. 93 - 99.
7. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности в районах Тянь-Шаня и Джунгарии: возможная подготовка сильных землетрясений / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вулканология и сейсмология, 2014. – № 3. – С. 65 - 73.
8. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности, формирующиеся в континентальных районах перед сильными землетрясениями с различными механизмами очагов / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Геофизические исследования, 2013. – Т. 14. - № 1. – С. 5 - 15.
9. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных S-волн в районе Байкальской рифтовой зоны и их связь с сейсмичностью / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вулканология и сейсмология, 2014. – № 5.
10. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения S-волн и кольцевые структуры сейсмичности в районе Байкальской рифтовой зоны / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2012. – Вып. 4. – С. 33 - 41.
11. Копничев, Ю.Ф. Характеристики кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в районе Суматры / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // ДАН, 2009 – Т. 429. - № 1. – С. 106 - 109.
12. Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации поля поглощения S-волн в районе Гиндукуша и их связь с глубокофокусной сейсмичностью / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2012. – Вып. 4. – С. 53 - 61.
13. Копничев, Ю.Ф. О природе короткопериодных сейсмических полей на расстояниях до 3000 км / Ю.Ф. Копничев, А.Р. Аракелян // Вулканология и сейсмология, 1988. – № 4. – С. 77 - 92.
14. Бакиров, А.Б. (ред.). Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью.- Бишкек: Илим, 2006. - 115 с.
15. Копничев, Ю.Ф. Короткопериодные сейсмические волновые поля. М.: Наука, 1985. – 176 с.
16. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных поперечных волн в литосфере Центральной Азии и их связь с сейсмичностью / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // ДАН, 2011. – Т. 437. - № 1. – С. 97 - 101.
17. Abers, G. Thrusting of the Hindu Kush over the southeastern Tadjic basin, Afghanistan: evidence from two large earthquakes / G.Abers, C.Bryan, S.Roecker, R.McCaffrey // Tectonics, 1988. – V.7 - N 1. – P. 41 - 56.
18. Буртман, В.С. Геодинамика Памир-Пенджабского синтаксиса // Геотектоника, 2013. – № 1. – С. 36 - 58.
19. Molnar, P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision / P.Molnar, P.Tapponnier // Science, 1975. – V. 189. – P. 419 - 426.

Из таблицы следует, что самое сильное землетрясение может готовиться в районе Афгано-Таджикской впадины, где находится наибольшая по площади аномалия высокого поглощения S-волн. Отметим, что в этом районе за последние 35 лет зарегистрированы два достаточно сильных события с M=6.7 (в 1982 и 1998 гг., рисунок 1). Более слабые землетрясения могут готовиться в области центрального Гиндукуша и на северной границе Памира.

В [2, 3, 8] показано, что наибольшая известная длительность формирования мелких кольцевых структур составляет около 40 лет; кроме того, наблюдается увеличение скорости СТД на заключительном этапе подготовки сильного сейсмического события. Исходя из этого, можно предполагать, что в ближайшие годы наиболее вероятны сильные землетрясения в районах Афгано-Таджикской впадины и Северного Памира; менее вероятны такие события в области центрального Гиндукуша.

20. Mohajer, S. Partitioning of India-Eurasia convergence in the Pamir-Hindu Kush from GPS measurements / S. Mohajer, R. Bendick, A. Ischuk et al. // *Geophys. Res. Lett.*, 2010. – V. 37. - L04305, doi: 10.1029/2009GL041737.
21. Zubovich, A. GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions / A. Zubovich, X. Wang, Yu. Scherba [et al] // *Tectonics*, 2010. - V. 29. - TC6014, doi: 10.1029/2010TC002772.
22. Летников, Ф.А. Синергетика геологических систем / Ф.А. Литников. – Новосибирск: Наука, 1992. – 229 с.
23. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности и землетрясение 11.03.2011 г. (Mw=9.0) в районе северо-восточной Японии / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // *ДАН*, 2011 – Т. 440.- № 2. – С. 246 - 249.
24. Yamazaki, T. Double seismic zone and dehydration embrittlement of the subducting slab / T. Yamazaki, T. Seno // *J. Geophys. Res.*, 2003. – V. 108. – N B4. doi: 10/1029/2002JB001918.
25. Gold, T. Fluid ascent through the solid lithosphere and its relation to earthquakes / T. Gold, S. Soter // *Pure Appl. Geophys.*, 1984/1985. – V. 122. – P. 492 - 530.

### **ПАМИРО-ГИНДУКУШ АЙМАҒЫНДАҒЫ S-ТОЛҚЫНДАРЫНЫҢ ЖҰТЫЛУ ӨРІСІНІҢ БІР ТЕКТІ ЕМЕСТІГІ ЖӘНЕ СЕЙСМИКАЛЫҚТЫҢ АЙНАЛМАЛЫ ҚҰРЫЛЫМЫ: БОЛАТЫН ҚАТТЫ ҚЫРТЫСТЫ ЖЕРСІЛКІНУЛЕРДІҢ ДАЙЫНДАЛУЫ**

<sup>1)</sup> Ю.Ф. Копничев, <sup>2)</sup> И.Н. Соколова

<sup>1)</sup> *РФА О.Ю. Шмидт атындағы Жер физикасы институты, Москва, Ресей*

<sup>2)</sup> *Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

Памиро-Гиндукуш аймағы үшін литосферадағы қысқа кезеңді көлденең толқындардың жұтылу өрісінің карталауы орындалды. Sn және Pn толқындары амплитудаларының қатынастығының талдауына негізделген әдіс қолданылды. Ауған-Тажік шұңғымасының, орталық Гиндукуш және Солтүстік Памир аудандарындағы жоғары жұтылу аудандары белгіленді. Осы аудандарда, 1973 жылдан бастап 0 - 33 и 34 - 70 км тереңдіктерінің диапазонында сейсмикалықтың айналмалы құрылымдары қалыптасқан. Әдетте осындай құрылымдар қатты жерсілкінулер алдында, субдукция зоналарында қалыптасады. Көрсетілген аудандарда айналмалы құрылымдардың сипаттамалары бойынша дайындалып жатқан қатты жерсілкінулердің магнитудалары бағаланды. Субдукция зоналарының аналогиясы бойынша, тереңдегі флюидтардың орындарын ауыстырып көшуінің нәтижесінде айналмалы құрылымдар пайда болады деп болжам жасалды.

### **HETEROGENEITIES OF S WAVE ATTENUATION FIELD AND RING-SHAPED SEISMICITY STRUCTURES IN THE PAMIR-HINDU KUSH REGION: POSSIBLE PREPARATION FOR LARGE CRUSTAL EARTHQUAKES**

<sup>1)</sup> Yu.F. Kopnichev, <sup>2)</sup> I.N. Sokolova

<sup>1)</sup> *Institute of the Earth Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2)</sup> *Institute of Geophysical Research Kurchatov, Kazakhstan*

We have been mapping short-period shear wave attenuation field in the lithosphere of the Pamir-Hindu Kush region. We used a method based on an analysis of amplitude ratio of Sn and Pn waves. Areas of high attenuation were identified in the regions of Afghan-Tadjic basin, Central Hindu Kush and North Pamir. Ring-shaped seismicity structures have been formed in these regions in the depth ranges of 0-33 and 34-70 km since 1973. Such structures are being formed usually in subduction zones prior to large earthquakes. We estimated magnitudes of large earthquakes, possibly been preparing in these regions using characteristics of ring structures. By analogy with subduction zones we suppose that ring-shaped seismicity structures are being formed due to deep-seated fluid migration.

УДК: 538.911

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ 12Х18Н10Т И ПОКРЫТИЙ TiMoN, ОБЛУЧЕННЫХ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ АЛЬФА-ЧАСТИЦАМИ

Уралов М.К., Ларионов А.С., Диков А.С., Кислицин С.Б.

*Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан*

Приведены результаты сравнительных исследований влияния облучения низкоэнергетическими альфа-частицами на изменения структуры и физико-механических свойств конструкционной стали 12Х18Н10Т и покрытий TiMoN. Установлено, что покрытия TiMoN в значительно меньшей степени подвержены деградации физико-механических свойств по сравнению со сталью 12Х18Н10Т. Благодаря высоким характеристикам покрытия TiMoN могут рассматриваться в качестве материалов защиты конструкционных материалов от ионизирующих излучений.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что покрытия на основе нитридов переходных металлов обладают повышенной твердостью, износостойкостью, термической стабильностью. Наилучшие результаты были обнаружены для многокомпонентных композиционных покрытий на основе твердых растворов нитридов нескольких металлов (Ti-Cr-N, Ti-Zr-N и другие [1-3]). Это позволяет предполагать, что такие системы будут перспективны в качестве защитных покрытий для конструкционных материалов изделий нефтеперерабатывающей, горнодобывающей, пищевой и других отраслей промышленности. Для этих отраслей актуальной задачей является создание материалов, обладающих хорошими механическими свойствами (прочность, термическая стабильность, износостойкость) и высокой коррозионной стойкостью по отношению к агрессивным средам. Активно развивающимся направлением создания таких материалов является нанесение обладающих этими свойствами защитных покрытий, не обладающие этими свойствами материалы, что позволяет значительно удешевить производство таких материалов. Перспективный класс таких материалов, которые можно использовать в качестве защитных покрытий, представляют собой тройные соединения нитридов переходных металлов – TiZrN, TiCrN, TiMoN.

Покрытия на основе тройных нитридов переходных металлов могут также рассматриваться как защитные к воздействию ионизирующих излучений. Однако воздействие облучения на такие покрытия малоизученно, можно отметить лишь ограниченное количество публикаций по системам TiZrN, TiCrN [4,5]. Поскольку по покрытиям TiZrN, TiCrN уже есть отдельные, хотя и далеко не полные исследования, см. [4,5], то покрытиям на основе соединения TiMoN уделено значительно меньше внимания. В литературе нами найдена только одна публикация по покрытиям TiMoN [6], в которой показана перспективность использования соединения TiMoN в качестве покрытий металлорежущих инструментов. Поэтому, в данной работе для изучения влияния

ионного облучения на структуру, коррозионную стойкость и твердость нами выбраны покрытия TiMoN, нанесенные на аустенитную сталь 12Х18Н10Т. Механические свойства и коррозионная стойкость покрытий TiMoN сопоставлены с этими же характеристиками нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

### 1. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Покрытия TiMoN синтезированы методом вакуумной конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ) на подложке из аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Покрытия TiMoN формировались методом КИБ при совмещении плазменных потоков титана и молибдена в остаточной атмосфере азота. Перед осаждением проводилась ионная бомбардировка стальной поверхности подложки ионами титана в течении 1 мин., при потенциале на подложке – 1 кВ, токе дуги катода из титана 100 А и давлении в камере 10-3 Па, что обеспечило очистку поверхности и подогрев ее до температуры 450-500 °С. Покрытия осаждались в атмосфере азота при давлении 10<sup>-1</sup> Па в камере и потенциале на подложке – 120 В и токах горения дуг катодов из титана и молибдена 100 А и 180 А, соответственно. Совмещение плазменных потоков титана и молибдена осуществлялось расположением двух катодов под углом 60° друг к другу на расстоянии 120 мм от подложки. Толщина полученных покрытий контролировалась временем осаждения.

Структура покрытия TiMoN определялась методом рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре D8 ADVANCE фирмы BRUCKER с использованием излучения рентгеновской трубки с медным анодом и графитовым монохроматором на дифрагированном пучке. Режим работы трубки следующий: напряжение 40 кВ, ток – 40 мА. Дифрактограммы записаны в диапазоне углов 2θ - 300 ÷ 1200, с шагом 0.020, время измерения на каждом шаге – 1 с. Съемка проводилась в двух геометриях – Брега-Брентано и скользящего пучка.

Определение элементного состава и толщины покрытий выполнено методом Резерфордского

обратного рассеяния на ионах азота с энергией 24 МэВ на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60.

Измерения твердости приповерхностных слоёв TiMoN, а также стали 12Х18Н10Т проводили методом склерометрии с использованием нанотвердомера «Наноскан-компакт». Измерение твердости методом склерометрии заключается в анализе профиля царапин, нанесенных на поверхность материала, подробнее см. в работе [7].

Электрохимические коррозионные испытания проводились в 3% соляном растворе NaCl при комнатной температуре, с помощью потенциостатической коррозионной ячейки фирмы «Gamry Instruments». Для определения коррозионных свойств в работе использовался потенциостатический метод поляризационных кривых по Тафелю. Данный метод является одним из самых быстрых и надежных способов определения скорости коррозии металла. В основе определения скорости коррозии лежит зависимость скорости анодного растворения металла от потенциала поверхности.

Тонкая структура поверхности изучалась методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопах JSM-7500 FA и HITACHI, оснащенных энергодисперсионным рентгеновским анализатором, а также методом атомно-силовой микроскопии (АСМ).

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### 2.1. Исследования структуры поверхности и физико-механических свойств покрытий TiMoN и стали 12Х18Н10Т до ионного облучения

*Определение элементного состава и толщины покрытий.* Испытания образцов с покрытиями TiMoN включали в себя определение элементного состава покрытия методами энергодисперсионного рентгеноспектрального анализа (ЭДРА) и Резерфордского обратного рассеяния (РОР). С помощью метода РОР определялась также толщина покрытий.

По результатам ЭДРА, определен элементный состав покрытия TiMoN, см. таблицу 1.

Результаты определения элементного состава и толщины покрытия РОР методом приведены в таблице 2.

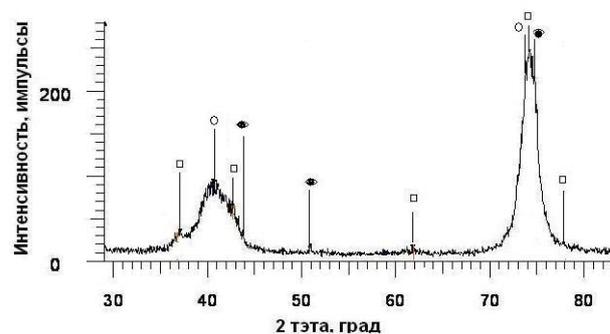
Таблица 1. Содержание элементов в покрытии TiMoN по данным ЭДРА

Элемент	Mo	Ti	N
Содержание, ат.%	52	28	20

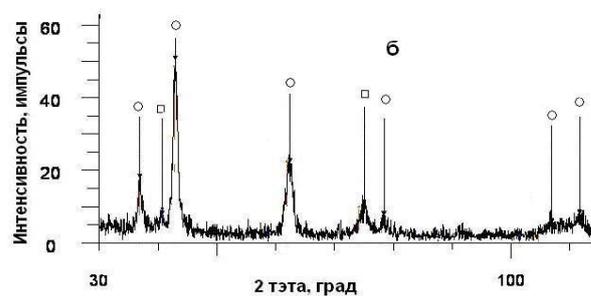
Таблица 2. Элементный состав и толщина покрытия TiMoN по результатам обработки РОР спектра

Расстояние от поверхности, нм	Содержание, ат. %			
	Ti	Mo	N	Fe
0 - 2500	50	30	20	0
> 2500	0	0	0	100

*Рентгеноструктурные исследования.* Типичная дифрактограмма образцов с покрытиями TiMoN на стали 12Х18Н10Т, снятая в геометрии Брега–Брентано, представлена на рисунке 1а. Как видно из представленной на этом рисунке дифрактограммы, подготовленные образцы представляют собой слоистую систему. Приповерхностный слой – покрытие, представляет собой соединение TiMoN с ГЦК решеткой типа решетки NaCl, постоянная решетки этого соединения составляет  $a = 0.4298$  нм. Причем содержание Mo неоднородно по толщине покрытия и увеличивается по мере увеличения расстояния от поверхности. Уширенные дифракционные пики свидетельствуют о достаточно низкой степени совершенства кристаллической решетки.



а



б

Рисунок 1. Дифрактограммы покрытия TiMoN на стали 12Х18Н10Т, снятые в геометрии Брега – Брентано (а) и скользящего пучка (б); ○ – TiMoN, □ – Mo, ● – аустенит 12Х18Н10Т

Дифрактограмма необлученной стали 12Х18Н10Т представлена на рисунке 2а. Из рисунка видно, что наряду с аустенитом (ГЦК структура) на дифрактограмме наблюдается некоторое содержание феррито-мартенситной  $\alpha$ -фазы (ГЦК – структура). Это связано с тем, что в процессе подготовки образец подвергался механической шлифовке и полировке.

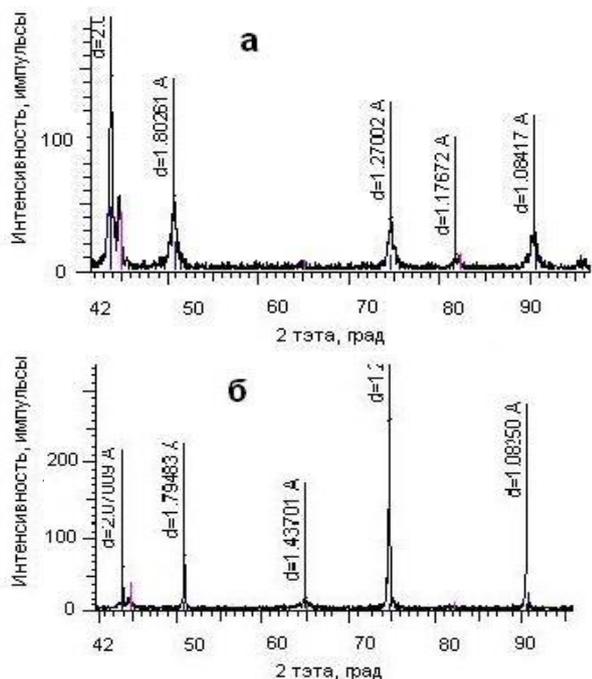


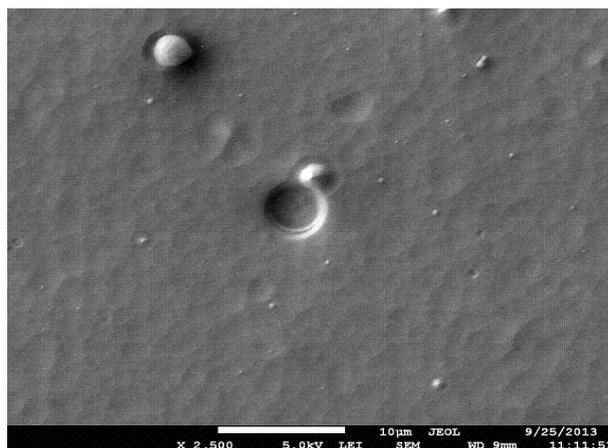
Рисунок 2. Дифрактограммы стали 12Х18Н10Т, снятые в геометрии Брега – Брентано до (а) и после (б) облучения альфа-частицами

Морфология поверхности покрытий TiMoN и нержавеющей стали 12Х18Н10Т до ионного облучения. Изучение структуры поверхности необлученных покрытий TiMoN проводилось методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ), поскольку применение оптической микроскопии (ОМ) оказалось малоинформативным, так как использование метода ОМ требует определенной подготовки поверхности, связанной с ее шлифовкой и полировкой, что нарушает структуру покрытия.

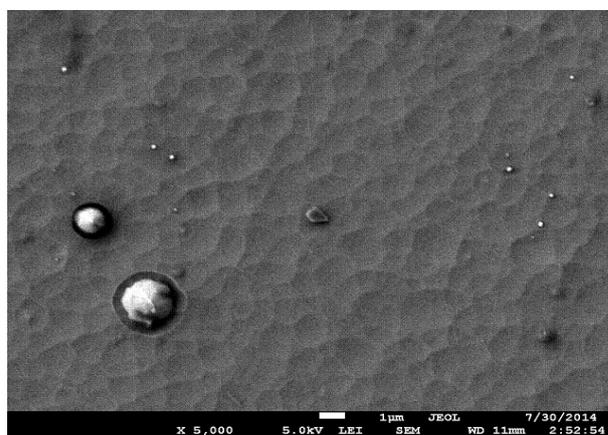
Поэтому в качестве основных методов изучения поверхности были выбраны РЭМ и АСМ, не требующие специальной подготовки поверхности. На рисунке 3а приведено электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности покрытия TiMoN до облучения ионами гелия.

Из рисунка 3а видно, что поверхность достаточно гладкая, но на ней, однако, наблюдается особенность в виде выступов или впадин, связанные с технологическими особенностями синтеза покрытия. Это подтверждается исследованиями, выполненными АСМ методом. На рисунке 4а показана структура этой же поверхности, полученной с помощью АСМ.

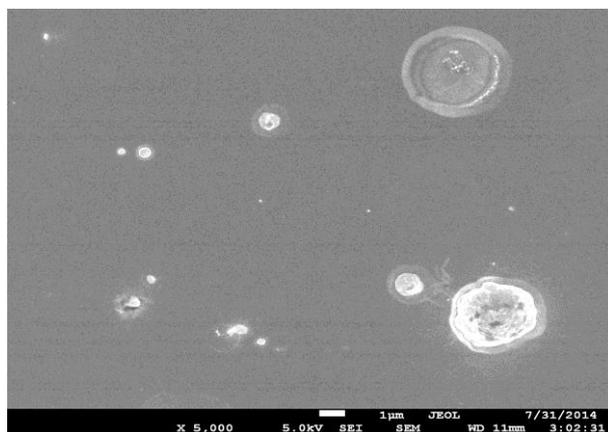
Изображение поверхности на рисунках 4а подтверждает вывод, сделанный из анализа изображений на рисунке 3а: поверхность покрытия TiMoN достаточно гладкая и однородная. Шероховатость поверхности не превышает 20-50 нм, но в тоже время на поверхности наблюдаются выступы и впадины.



а – ×2000



б – ×5000



в – ×5000

Рисунок 3. РЭМ изображения поверхности покрытий TiMoN до (а) и после облучения альфа-частицами с энергией 40 кэВ до флюенсов  $1 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$  (б) и  $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  (в)

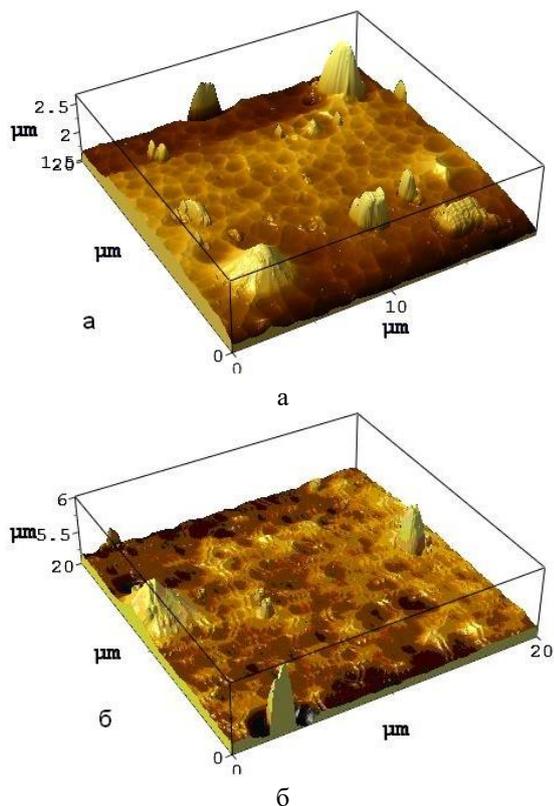


Рисунок 4. Структура поверхности покрытий TiMoN, полученная АСМ методом, (а) – необлученное покрытие, (б) – облученное ионами  $He^{+2}$  с энергией 40 кэВ до флюенса  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>

Изображения поверхности необлученной стали 12Х18Н10Т, выполненные методами РЭМ и АСМ показаны на рис. 5(а, б), соответственно. Из рисунков видно, что поверхность стали достаточно гладкая, но при этом наблюдаются полосы – следы от манипуляций при подготовке образцов, т.е. шлифовки и полировки.

Исследования физико-механических характеристик соединения TiMoN и аустенитной стали 12Х18Н10Т до облучения. Как следует из рисунков 3а и 4а, на поверхности покрытия TiMoN присутствуют впадины диаметром ~5 мкм и глубиной до 10 нм, а так же технологических частиц диаметром 3-8 мкм. Твердость покрытия TiMoN характеризуется различным значением по глубине - это связано с неоднородностью элементного состава. На глубине до 40 нм нанотвердость составляет порядка 25 ГПа, до 50 нм – 39 ГПа, до 100 нм – 61,39 ГПа, свыше 100 нм – 73,82 ГПа. Для твердости поверхности стали 12Х18Н10Т характерно наличие деформационно-упрочненного слоя глубиной ~ 80 нм, твердость которого составляет 4,39 ГПа, далее по глубине твердость стали уменьшается и составляет ~ 2 ГПа и постепенно снижается до значений микротвердости (~300 МПа) с увеличением расстояния до поверхности. Значения величин твердости покрытия TiMoN и стали 12Х18Н10Т приведены в таблице 3.

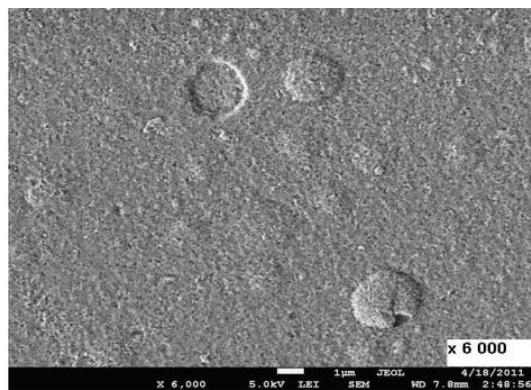
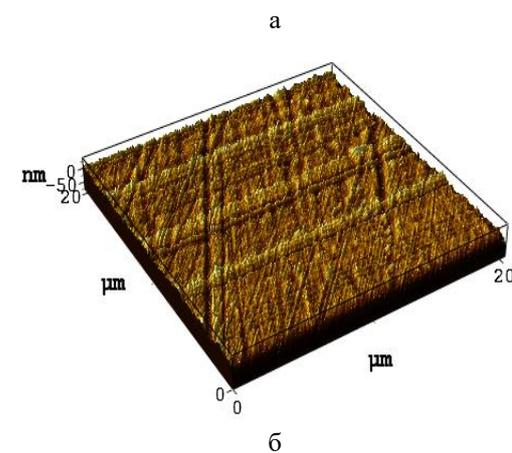
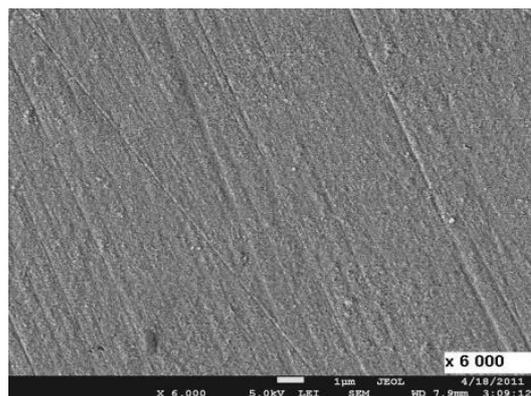


Рисунок 5. РЭМ изображения поверхности стали 12Х18Н10Т до (а) и после (в) облучения альфа-частицами с энергией 40 кэВ до флюенса  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>; (б) – АСМ изображение поверхности стали до облучения низкоэнергетическими альфа-частицами

Таблица 3. Нанотвердость TiMoN стали 12Х18Н10Т и параметры шероховатости поверхности

Материал	H <sup>(1)</sup> , ГПа	dH <sup>(2)</sup> , %	N <sub>min</sub> <sup>(3)</sup> , мН	Ra <sup>(4)</sup> , нм
TiMoN необлученный	35	62	10, 15, 20	20
Сталь 12Х18Н10Т	3,3	10	10, 15, 20	214

- (1): H – усредненное значение нанотвердости поверхности,  
 (2): dH – максимальное отклонение от среднего значения,  
 (3): N<sub>min</sub> – нагрузка на индентор,  
 (4): Ra – среднеарифметическое значение шероховатости.

Коррозионная стойкость соединения TiMoN и аустенитной стали 12Х18Н10Т до ионного облучения. По результатам испытаний коррозионных стойкости получены поляризационные кривые, показанные на рис. 6. С помощью полученных поляризационных кривых были рассчитаны скорости коррозии покрытия TiMoN и стали 12Х18Н10Т, см. таблицу 4. Из таблицы видно, что скорость коррозии стали значительно выше по сравнению со скоростью коррозии TiMoN. Следовательно, покрытие TiMoN обладает значительно большей коррозионной стойкостью по сравнению со сталью 12Х18Н10Т.

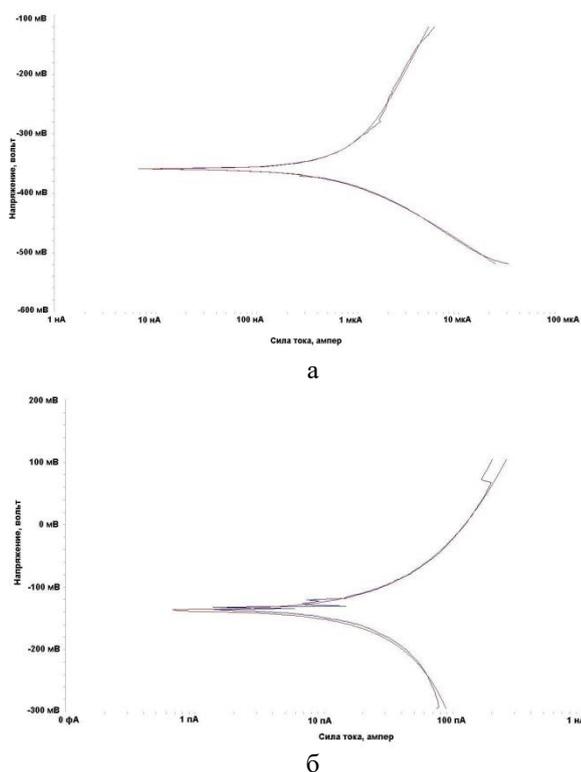


Рисунок 6. Поляризационные кривые стали 12Х18Н10Т (а) и TiMoN (б) при испытаниях в 3% растворе NaCl

Таблица 4. Характеристики коррозионной стойкости необлученного покрытия TiMoN и нержавеющей стали 12Х18Н10Т

Параметры коррозии	$I_{кор}$ , нА	$E_{кор}$ , мВ	$V_{кор}$ мм/год
Покрытие TiMoN	$224 \times 10^{-3}$	-137	$6 \times 10^{-6}$
Сталь 12Х18Н10Т	946	-359	$9 \times 10^{-3}$

## 2.2. Исследования структуры поверхности и физико-механических свойств покрытий TiMoN и стали 12Х18Н10Т после облучения низкоэнергетическими альфа-частицами

Исследования структуры и свойств образцов покрытий TiMoN и стали 12Х18Н10Т после облучения низкоэнергетическими альфа-частицами выполнялись теми же экспериментальными методиками, что и для необлученных образцов.

Рентгеноструктурные исследования. Исследования структуры облученных ионами гелия образцов с покрытиями TiMoN, выполненные методом рентгеновской диффрактометрии, показали, что существенных изменений кристаллической структуры этих соединений не наблюдается. Дифракционная картина, приведенная на рисунке 1, не претерпевает существенных изменений – не наблюдается образования новых фаз. Основные изменения состоят в уширении линий, связанных с наличием дефектов радиационного происхождения формирующихся при облучении, и изменении высот дифракционных пиков.

Иная картина наблюдается для нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Если структура стали до облучения двухфазная, с преобладанием  $\gamma$ -фазы аустенита (ГЦК – структура) текстурированной по плоскости (220), с некоторым содержанием ОЦК  $\alpha$ -фазы, то после облучения альфа-частицами количество мартенситной  $\alpha$ -фазы существенно возросло. Т.е. облучение низкоэнергетическими альфа-частицами стали 12Х18Н10Т, в отличие от соединения TiMoN, приводит к изменению фазового состава. Этот эффект, стимулированное ионным облучением фазовое  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение и ранее наблюдался нами в стали 12Х18Н10Т [8].

Морфология поверхности покрытий TiMoN и нержавеющей стали 12Х18Н10Т после ионного облучения. На рисунке 3(б, в) приведены электронно-микроскопические изображения структуры поверхности покрытия TiMoN, облученной низкоэнергетическими ионами гелия до различных флюенсов. Из сравнения изображений на рисунках 3(б, в) с изображением на рисунке 3а видно, что облучение ионами гелия незначительно сказывается на структуре поверхности. После облучения флюенсом альфа-частиц  $1 \times 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> заметных изменений морфологии поверхности не наблюдается вообще. При флюенсе облучения  $1 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> можно отметить только некоторое сглаживание поверхности, но выступы и впадины на поверхности по-прежнему остаются.

Наиболее значительным эффектом при ионном облучении является распыление поверхности, но для альфа-частиц коэффициент распыления поверхности мал и составляет  $\sim 10^{-2}$  ат./ион (расчет по программе SRIM) и распыленный слой для флюенса альфа-частиц  $1 \times 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> составляет  $\sim 0.06$  нм, т.е. менее одного атомного слоя. Для флюенса альфа-частиц  $1 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> толщина распыленного слоя составляет  $\sim 0.6$  нм, т.е. порядка одного - двух атомных слоев, поэтому эффект распыления поверхности альфа-частицами незначителен и не проявляется ярко ни для покрытия TiMoN, ни для стали 12Х18Н10Т.

Другим важным эффектом при облучении альфа-частицами металлических материалов является накопление гелия в приповерхностных слоях, что, как

показывают, в том числе и наши результаты, может приводить к блистерингу и шелушению поверхности [8]. Этот эффект ярко наблюдается для стали 12Х18Н10Т. Как видно из сравнения РЭМ изображений поверхности на рисунках 5а и 5в облучение приводит к формированию и выходу на поверхность наполненных гелием пузырьков, т.е. блистерингу, а также раскрытию этих пузырьков с образованием кратеров на поверхности, т.е. шелушению (флекингу). Эффект блистеринга наблюдается при флюенсах альфа-частиц, начиная с  $5 \times 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>. При флюенсе  $1 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup> блистеринг не наблюдается, при флюенсе  $5 \times 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> наблюдаются выступы на поверхности, которые являются проявлением формирования наполненных гелием пор в приповерхностном слое, а при флюенсе  $1 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> наблюдаются и блистеринг и флекинг. Зависимость образования гелиевых пор и выхода их на поверхность от флюенса альфа-частиц определяется степенью пересыщения атомами гелия области страглинга альфа-частиц. Результаты исследований структуры облученной поверхности стали АСМ методом подтверждают результаты полученные РЭМ методом. В тоже время, как видно из сравнения представленных на рисунке 3а и 3(б, в) снимков для покрытий TiMoN не наблюдается формирование и выход на поверхность наполненных гелием пузырьков при флюенсах альфа-частиц от  $1 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup> до  $1 \times 10^{17}$  см<sup>-2</sup>. Следовательно, можно утверждать, что покрытия TiMoN обладают более высокой стойкостью к образованию гелиевой пористости и блистерингу по сравнению с конструкционной сталью 12Х18Н10Т.

*Исследования физико-механических характеристик соединения TiMoN и стали 12Х18Н10Т после облучения.* Измерения твердости облученных покрытий TiMoN низкоэнергетическими ионами гелия, см. таблицу 5, показали, что наблюдается увеличение твердости покрытия после облучения ионами гелия по сравнению с твердостью необлученного. Шероховатость облученной поверхности покрытия TiMoN возрастает, см. таблицу 5, и связано это с ионным травлением поверхности, как показано в предыдущем разделе.

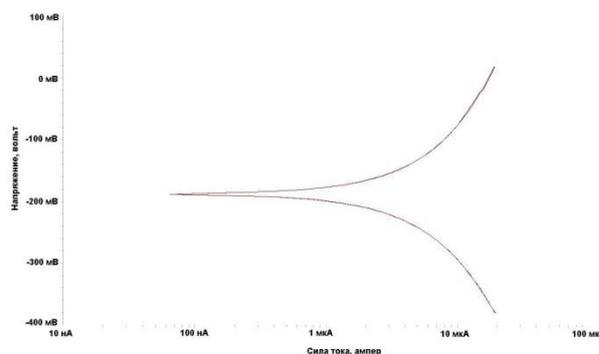
*Таблица 5. Нанотвердость и параметры шероховатости покрытия TiMoN стали после облучения низкоэнергетическими ионами гелия*

Покрытие, условия облучения	H <sup>(1)</sup> , ГПа	dH <sup>(2)</sup> , %	N <sub>min</sub> <sup>(3)</sup> , мН	Ra <sup>(4)</sup> , нм
TiMoN, облученный 40 кэВ <sup>4</sup> He <sup>+2</sup> , Φ=5×10 <sup>16</sup> см <sup>-2</sup>	53	22	10	30
Сталь 12Х18Н10Т, облученный 40 кэВ <sup>4</sup> He <sup>+2</sup> , Φ=1×10 <sup>16</sup> см <sup>-2</sup>	4	46	10	150

- (1): H – усредненное значение нанотвердости поверхности;  
 (2): dH – максимальное отклонение от среднего значения;  
 (3): N<sub>min</sub> – нагрузка на индентор;  
 (4): Ra – среднеарифметическое значение шероховатости.

Достаточно интересной является закономерность изменения твердости покрытия с расстоянием от поверхности. Так как с увеличением нагрузки на индентор увеличивается глубина его проникновения, то и определяется твердость слоев более удаленных от поверхности. Это позволяет измерять твердость в зависимости от расстояния до поверхности. Установлено, что по мере увеличения расстояния от поверхности покрытия TiMoN величина твердости уменьшается и на глубине большей 100 нм, т.е. сопоставимой с пробегом 40 кэВ альфа-частиц практически равна твердости необлученного покрытия. Для стали, при флюенсе альфа-частиц Φ=1×10<sup>16</sup> ион/см<sup>2</sup>, твердость незначительно возрастает, при дальнейшем увеличении флюенса значение нанотвердости определить не удалось, так как индентор «проваливается» при попадании в образовавшиеся кратеры.

*Коррозионная стойкость соединения TiMoN и аустенитной стали 12Х18Н10Т после облучения.* Измерения коррозионных свойств покрытия TiMoN облученных низкоэнергетическими ионами гелия, см. диаграмму на рисунке 7 и данные таблицы 6, показали, что наблюдается значительное снижение скорости коррозии покрытия TiMoN облученного гелием. Но, при этом коррозионная стойкость облученного покрытия значительно (в три раза) превышает коррозионную стойкость даже необлученной стали 12Х18Н10Т.



*Рисунок 7. Поляризационные кривые для покрытия TiMoN облученного ионами гелия <sup>4</sup>He<sup>+2</sup> с энергией 40 кэВ до флюенса, Φ=5×10<sup>16</sup> ион/см<sup>2</sup>*

*Таблица 6. Характеристики коррозионной стойкости облученного <sup>4</sup>He<sup>+2</sup> соединения TiMoN*

Параметры коррозии	I <sub>корр</sub> , мкА	E <sub>корр</sub> , мВ	V <sub>корр</sub> , мм/год
Покрытие TiMoN облученное 40 кэВ <sup>4</sup> He <sup>+2</sup> , Φ=5×10 <sup>16</sup> см <sup>-2</sup>	14,40	-188	367×10 <sup>-3</sup>

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

– Рентгеноструктурные исследования показали, что облучение низкоэнергетическими альфа-частицами стали 12X18H10T, в отличие от соединения TiMoN, приводит к значительному изменению фазового состава.

– Исследования морфологии поверхности показали, что облучение ионами гелия незначительно сказывается на структуре поверхности.

– Эффект распыления поверхности альфа-частицами незначителен и не проявляется ярко ни для покрытия TiMoN, ни для стали 12X18H10T.

– Покрытия TiMoN обладают более высокой стойкостью к образованию гелиевой пористости и блистерингу по сравнению с конструкционной сталью 12X18H10T.

– Облучение покрытий TiMoN низкоэнергетическими ионами гелия приводят к увеличению твердости и шероховатости покрытия.

– Коррозионная стойкость покрытий TiMoN при облучении низкоэнергетическими ионами гелия заметно снижается, но и при этом значительно превышает коррозионную стойкость даже необлученной стали 12X18H10T.

– Из проведенных испытаний следует, что по всем параметрам – прочности, коррозионной стойкости и склонности к газовому распуханию покрытие TiMoN многократно превосходит нержавеющей конструкционную сталь 12X18H10T. Благодаря такой высокой прочности и коррозионной стойкости покрытия TiMoN могут эффективно использоваться в качестве защиты конструкционных материалов изделий ядерной техники.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ивановский А.Л. Тройные карбиды и нитриды на основе переходных металлов и элементов IIIB- и IVB-подгрупп: электронное строение и химическая связь. // Успехи химии – 1996. - Т.65. - №6. - С. 499-518.
2. Uglov. V.V., Anishchik V.M., Zlotski S.V., Abadias G., Dub S.N. Structural and mechanical stability upon annealing of arc-deposited Ti-Zr-N coatings. Surf.Coat.Technol // 2008. - V.208. - P.2394-2398.
3. Кулешов А. К., Ходасевич В. В., Углов В. В., Анищик В. М., Даниленок М. М. Термостабильность поверхностных слоев нитридов титана и хрома, сформированных конденсацией с ионной бомбардировкой на твердом сплаве T5K10 // Перспективные материалы - 2009.- №2.- С. 68-73.
4. Uglov V.V., Rusalski D.P., Zlotski S.V, Sevriuk A.V., Abadias G., Kislitsin S.B., Kadyrzhanov K.K., Gorlachev I.D., Dub S.N. Stability of Ti-Zr-N coatings under Xe-ion irradiation // Surface & Coatings Technologies. 2010. V. 204. P. 2095 – 2098.
5. Kislitsin S., Gorlachev I., Uglov V. Surface Structure of Cr0.5Ti0.5N coating after heavy ions irradiation and annealing. // Structural Materials for Innovative Nuclear System (SMINS-3). Workshop Proceedings. Eds. OECD 2015. - P. 266-279.
6. Табаков В.П., Смирнов М.Ю., Циркин А.В. Тонкопленочные многослойные покрытия побеждают трещины // Фундаментальные основы инженерных наук. Российский фонд фундаментальных исследований. – 2008. – С.8.
7. Ларионов А.С., Полтавцева В.П., Кислицин С.Б.: «Особенности изменения нанотвёрдости приповерхностных слоёв сплава Ni-Ti в зависимости от условий облучения тяжёлыми ионами газовых элементов» // Материалы XII МНК «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов», Усть-Каменогорск, 2015 г.
8. Кислицин С.Б., Верещак М.Ф., Манакова И.А., Озерной А.Н., Сатпаев Д.А., Тулеушев Ю.Ж. Блистеринг и  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращения при отжиге стали 12X18H10T, облученной низкоэнергетическими альфа-частицами // Вопросы атомной науки и техники. Сер. физика радиац. поврежд. и радиац. материаловед. 2013. №2 (84). С.17-22.

### ТӨМЕН ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ АЛЬФА-БӨЛШЕКТЕРМЕН СӘУЛЕЛЕНГЕН 12X18H10T БОЛАТ ПЕН TiMoN ҚАПТАМАЛАРЫНЫҢ ФИЗИКА-МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНІҢ ӨЗГЕРУІН САЛЫСТЫРМАЛЫ ЗЕРТТЕУ

М.К. Уралов, А.С. Ларионов, А.С. Диков, С.Б. Кислицин

*ҚР ҰАО Ядролық физика институты, Алматы, Kazakhstan*

Төмен энергетикалық альфа-бөлшектермен сәулелендірудің 12X18H10T конструкциялық болат пен TiMoN қаптамаларының құрылымы мен физика-механикалық қасиеттеріне әсер етуін салыстырмалы зерттеу нәтижелері берілген. TiMoN қаптамаларының физика-механикалық қасиеттерінің 12X18H10T болатпен салыстырғанда айтарлықтай аз деңгейде бұзылғандығы белгілі болды. Жоғары сипаттамаларының арқасында TiMoN қаптамаларын конструкциялық материалдарды иондаушы сәулеленуден қорғайтын материал ретінде қарастыруға болады.

**THE COMPARATIVE INVESTIGATIONS OF CHANGES IN PHYSICAL  
AND MECHANICAL PROPERTIES OF 12Cr18Ni10Ti STEEL AND COATINGS TiMoN,  
IRRADIATED WITH LOW-ENERGY ALPHA PARTICLES**

**M.K. Uralov, A.S. Larionov, A.S. Dikov, S.B. Kislitsin**

*Institute of Nuclear Physics of NNC RK, Almaty, Kazakhstan*

The results of comparative studies of the effect of irradiation with low-energy alpha particles on the changes of structure and physical-mechanical properties of the structural steel 12X18H10T and coatings TiMoN are presented. It is shown that coating TiMoN much less prone to degradation of the physical and mechanical properties compared to the steel 12X18H10T. Due to the high radiation resistance to radiation impact the coating TiMoN can be seen as protective material for structural steels.

УДК 533.9.08

## ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ В КАНАЛЕ УСКОРИТЕЛЯ С НЕЙТРАЛИЗАЦИОННЫМ ДРЕЙФОМ ИОНОВ

<sup>1)</sup> Хасенов М.У., <sup>2)</sup> Азаматов З.Т., <sup>3)</sup> Редкорчев В.И., <sup>3)</sup> Кулагин И.А., <sup>1)</sup> Надинов И.У.,  
<sup>1)</sup> Уразбаев А.О., <sup>1)</sup> Кайканов М.И.

<sup>1)</sup> Назарбаев Университет, Частное Учреждение “National Laboratory Astana”, Астана, Казахстан  
<sup>2)</sup> НИИ Прикладной физики Национального Университета Узбекистана им. Мирзо Улугбека, Ташкент, Узбекистан  
<sup>3)</sup> Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУ, Ташкент, Узбекистан

Особенностью ускорителя NDCX-II является сжатие ионного пучка благодаря нейтрализации пространственного заряда в результате дрейфа в плазме низкой плотности ( $10^{10}$ - $10^{12}$  см<sup>-3</sup>). Для интерферометрической диагностики плазмы могут быть использованы как гомодинный, так и гетеродинный методы. Однако, ввиду сравнительно малой величины фазового сдвига при низкой плотности плазмы применение первого метода неэффективно. Детализирована схема гетеродинного интерферометра для определения плотности плазмы в канале нейтрализационного дрейфа ускорителя ионов.

Для пространственной диагностики плазмы рассмотрены методы двухэкспозиционной цифровой голографической интерферометрии с высоким временным и пространственным разрешением. Временное разрешение будет определяться длительностью лазерных импульсов (300 пс – 10 нс), а пространственное разрешение составит порядка длины волны лазерного излучения. Предполагается использовать излучение с  $\lambda_1=1,06$  мкм,  $\lambda_2=0,53$  мкм и  $\lambda_3=0,35$  мкм. Ультрафиолетовое излучение будет использоваться для диагностики плазмы с высокой концентрацией, а инфракрасное излучение – для низкой концентрации.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из возможных вариантов осуществления управляемого термоядерного синтеза является использование мощных наносекундных пучков ионов для разогрева и сжатия дейтерий-тритиевой мишени. Для развития работ в области физики плазмы, управляемого термоядерного синтеза, ядерных реакций, материаловедения, критического состояния вещества в Назарбаев-Университете начаты работы по созданию ускорителя ионов. Прототипом проектируемого ионного ускорителя служит ускоритель NDCX-II в Национальной Лаборатории им. Лоуренса в Беркли, США [1]. Поток ионов ускорителя NDCX-II представляет собой пучок однократно ионизованных ионов лития радиусом 2 см и длиной 20 см после конечной ячейки, средняя энергия ионов 1,2 МэВ, заряд пучка 50 нКл. Особенностью ускорителя NDCX-II является сжатие ионного пучка благодаря нейтрализации пространственного заряда в результате дрейфа в плазме низкой плотности ( $10^{10}$ - $10^{12}$  см<sup>-3</sup>) [2]. Большое значение при этом имеет диагностика плазмы в той части экспериментальной установки, где происходит нейтрализация и фокусировка луча.

Электрические зонды перекрывают область плазмы и не пригодны для диагностики в режиме реального времени. К тому же необходимая в этом случае скорость ионов определяется из расчетов или косвенных экспериментов [3]. Применение спектральных методов диагностики [4] затруднено из-за низкой плотности плазмы и сложности интерпретации результатов в силу пространственной неоднородности плазмы. Хотя преимуществом могло бы служить отсутствие ударного уширения линий в условиях ва-

куума в камере ( $\sim 10^{-6}$  Торр). По похожим причинам не возможно определение концентрации ионов в плазме по томсоновскому рассеянию лазерного излучения [5]. В этих условиях наиболее приемлемым является использование интерферометрических методов диагностики [6, 7]. В настоящей работе рассмотрены методы гетеродинной интерферометрии и цифровой голографической интерферометрии для диагностики плазмы низкой плотности.

### КОНФИГУРАЦИЯ ГЕТЕРОДИННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ В УСКОРИТЕЛЕ ИОНОВ

Интерферометрические методы диагностики плазмы основаны на соотношении для сдвига фаз  $\Delta\varphi$  при прохождении светового луча через область плазмы [5]. Из-за близости показателя преломления света  $N$  к единице изменение фазы в данной области может быть представлено в виде:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi l}{\lambda_0} (1 - N) = \frac{e^2}{mc^2} \lambda_0 n_e l = \text{const} \cdot n_e l \quad (1)$$

где  $e$ ,  $m$  – заряд и масса электрона,  $n_e$  – плотность электронов,  $l$  – длина плазменной области,  $\lambda_0$  – длина волны в опорном канале. Таким образом, набег фазы пропорционален электронной плотности.

Для интерферометрической диагностики могут быть использованы как гомодинный, так и гетеродинный методы. Однако, ввиду сравнительно малой величины фазового сдвига при низкой плотности плазмы применение первого метода неэффективно. В связи с этим необходимо использование гетеродинного метода, для которого требуется лазерное излучение с двумя частотами (сигнальная и опорная волна) [6].

Подобран элементный состав гетеродинного интерферометра для исследования импульсной плазмы (рисунок 1). Лазерный луч делится на две части, одна проходит сквозь плазму и набирает сдвиг по фазе  $\varphi(t)$ , другая проходит брегговскую ячейку и её частота меняется на величину  $\omega_0$ . Оба луча затем попадают на скоростной фотоприемник, сигнал на детекторе пропорционален [8]:

$$I(t) = A + B \cos[\omega_0 t + \varphi(t)]$$

здесь  $A$  и  $B$  являются константами. Длительность импульса с ферроэлектрического источника составляет около 10 микросекунд. Таким образом, при измерении параметров плазмы необходимо временное разрешение в сотни наносекунд, сравнимое с длительностью пучка на входе в зону дрейфа. Тогда для акустооптического модулятора подходит обычно используемая частота модуляции 80 МГц. Плотность плазмы от улучшенных ферроэлектрических источников составляет  $10^{10} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , в дальнейшем предполагается увеличить ее до  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Сдвиг фазы лазерного луча при прохождении области нейтрализационного дрейфа, рассчитанный по формуле (1), составляет от  $2 \cdot 10^{-5}$  до  $3 \cdot 10^{-2}$  радиан. Система регистрации интерференционного сигнала должна обеспечить разрешение не менее  $10^{-5}$  радиан. Необходимая для регистрации сигнала в широком диапазоне мощность гелий-неонового лазера составляет не менее 3 мВт. В качестве зондирующего лазера выбран гелий-неоновый лазер R30991 со стабилизацией мощности (5 мВт) и длиной волны 633 нм от компании Newport.

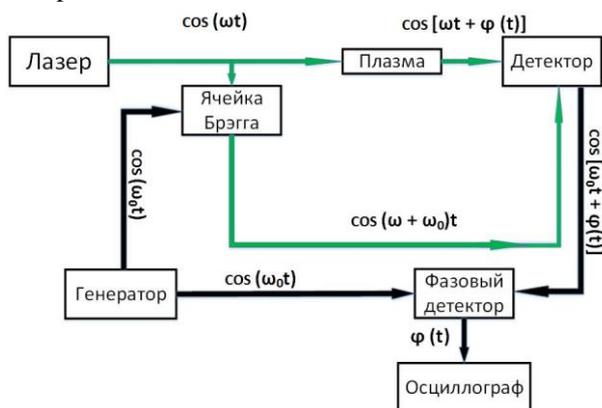


Рисунок 1. Схема гетеродинного интерферометра

Важным элементом гетеродинного интерферометра является акустооптический модулятор (ячейка Брегга). Акустооптический модулятор это электрически перестраиваемая дифракционная решетка, работающая на принципе объемной (брегговской) дифракции светового пучка на неоднородностях показателя преломления. Такие неоднородности возникают при возбуждении в двулучепреломляющих кристаллах ультразвуковой акустической волны. Акустическая волна в кристалле возбуждается при помощи пьезоэлектрического преобразователя, на

который подается перестраиваемый сигнал высокой частоты (порядка 10-200 МГц, при мощности, как правило, не превышающей нескольких ватт). В качестве материала модулятора часто используется кристаллическая двуокись теллура (парателлурит,  $\text{TeO}_2$ ). Это - тетрагональный кристалл группы 422, прозрачный в диапазоне 0,35-5 мкм, отличается высокими акустооптическими характеристиками: рекордно низкой скоростью сдвиговой волны – 617 м/с, что дает очень высокий коэффициент оптического качества, в 600-800 раз больше, чем, например, у плавленного кварца. Это означает, что для 100% отклонения или модуляции падающего излучения достаточны мощности возбуждения, измеряемые милливаттами.

Акустооптический модулятор OAM1141-T80S-2 компании Isomet изготовлен из кристалла  $\text{TeO}_2$  и предназначен для работы на длине волны гелий-неонового лазера – 633 нм. Рабочая апертура кристалла 2 мм, центральная частота возбуждения модулятора 80 МГц, номинальная потребляемая мощность 0,3 Вт. Рабочая частота модулятора  $\omega_0$  задается генератором (драйвером) типа 522C-L, при этом эффективность дифракции составляет не менее 80%. Характеристики генератора: рабочая частота – 80 МГц; точность установки частоты – 0,1%; стабильность частоты – 0,1%; выходная мощность – не менее 1,7 Вт; источник постоянного тока – +15 В, 400 мА; длительность переднего фронта тока генератора – нс.

Лучи лазера, после прохождения плазмы или акустооптического модулятора попадают на скоростной кремниевый фотодиод типа DET025A компании Thorlabs с параметрами: входное окно – плоское с просветляющим покрытием; диаметр рабочей области – 250 мкм; спектральный диапазон – от 400 до 1100 нм; максимум чувствительности – на 730 нм; максимальная рабочая частота – 2 ГГц; длительность переднего фронта – 150 пикосекунд; длительность заднего фронта – 150 пикосекунд; выходное напряжение – от 0 до 2 В; темновой ток – до 35 пикоампер.

На фазовый детектор попадают сигналы от драйвера с частотой 80 МГц и сигнал со скоростного фотодиода. Фазовый детектор выделяет сигнал пропорциональный фазовому сдвигу после прохождения плазмы и, соответственно, плотности исследуемой плазмы в данный момент времени. Будет использован фазовый детектор типа ZRPD-1+ фирмы Mini-Circuits. Частота принимаемого сигнала фазовым детектором от 1 до 100 МГц, чувствительность детектора не менее 8 мВ/градус, максимальное выходное напряжение 1000 мВ.

Создаваемый гетеродинный интерферометр должен обеспечить регистрацию плотности исследуемой плазмы от  $10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-3}$  с временным разрешением в десятки наносекунд. Гетеродинный интерферометр будет установлен на экспериментальном

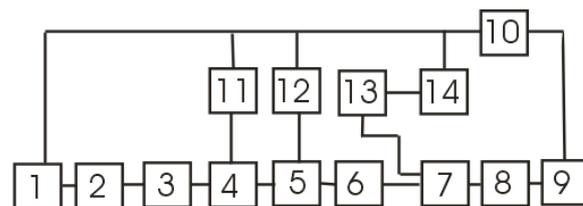
стенде для исследования параметров плазмы поверхностного пробоя.

**МЕТОД ПРОСТРАНСТВЕННО РАЗРЕШЕННЫХ  
ИЗМЕРЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ  
ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ  
ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ**

Для реализации пространственной диагностики может быть использована схема интерферометра, аналогичная интерферометру Волластоновского типа (интерферометр сдвига) [9]. Для записи 2D-полосное изображение в этой конфигурации должна быть использована цифровая камера вместо фотодиода. С помощью быстродействующих камер можно измерить профиль плотности для одного кадра в различных временных промежутках. После диагностической проверки и введения в эксплуатацию автономной цифровой камеры данная схема может быть интегрирована в лучевую линию ускорителя. В этом случае может быть реализована возможность создания полностью автоматизированной компьютерной системы, которая управляет плотностью плазмы по желанию оператора.

Предлагаемая схема регистрации, основанная на методах двухэкспозиционной цифровой голографической интерферометрии, позволит получать измерительную информацию с высоким временным и пространственным разрешением. Для пространственной диагностики плазмы предполагается использовать методы двухэкспозиционной цифровой голографической интерферометрии (ЦГИ) с высоким временным и пространственным разрешением. Временное разрешение будет определяться длительностью лазерных импульсов (300 пс – 10 нс), а пространственное разрешение составит порядка длины волны лазерного излучения. Предполагается использовать излучение с  $\lambda_1=1,06$  мкм,  $\lambda_2=0,53$  мкм и  $\lambda_3=0,35$  мкм. Ультрафиолетовое излучение будет использовано для диагностики плазмы с высокой концентрацией, а инфракрасное излучение – для низкой концентрации. Метод регистрации и обработки цифровых голограмм в излучении импульсного пикосекундного лазера одновременно на трех длинах волн был исследован в [10], также исследованы схемы диагностики различных материалов методами ЦГИ [11].

Основные трудности, которые могут возникнуть при регистрации параметров плазмы на ускорителе ионов, связаны с большими вибрациями. Эти трудности устраняются применением для регистрации коротких лазерных импульсов, а также использованием интерферометра собранного по схеме бокового сдвига [9]. В частности, при амплитуде вибраций 1 мм следующих с частотой 10 Гц относительная точность фазовых измерений составит  $\sim 10^{-5}$  для длительности лазерного импульса в оптическом диапазоне равной 1 нс. С уменьшением длительности импульса точность измерений возрастает.



1 – блок диодной накачки; 2 – seed YAG лазер; 3 – изолятор Фарадея; 4 – трехпроходный усилитель; 5 – усилитель; 6 – блок генерации гармоник; 7 – интерферометр; 8 – ССD камера; 10 – схема синхронизации; 11, 12 – блоки ламповой накачки; 13 – акустооптический модулятор; 14 – DPSS лазер

*Рисунок 2. Блок-схема диагностики оптических свойств плазмы методами ЦГИ*

Ниже дается описание блок-схемы диагностики плазмы (рисунок 2):

1 – блок диодной накачки содержит лазерный диод мощностью 35 Вт, длина волны излучения 802 нм. Сформированный импульс накачки длительностью 350 мкс подается по световоду диаметром 300 мкм.

2 – seed YAG лазер. Активный элемент лазера иттрий-алюминиевом гранате (YAG) имеет размеры  $\varnothing 3 \times 6$  мм. На торец элемента со стороны диодной накачки нанесено дихроическое зеркало, которое пропускает излучение на  $\lambda=802$  нм и отражает излучение на  $\lambda=1063$  нм. Это зеркало образует первое зеркало резонатора. Второе зеркало резонатора имеет коэффициент отражения 95% и на его поверхность нанесен слой YAG:Cr для модуляции добротности резонатора. При смещении зеркала меняется длина резонатора и длительность гигантского импульса. При минимальной длине резонатора длительность импульса равна 300 пс. Энергия излучения в импульсе равна 90 мкДж.

3 – изолятор Фарадея на постоянных магнитах ( $\varnothing 5$  мм).

4 – трехпроходный усилитель на YAG  $\varnothing 7 \times 65$  мм. Активный элемент находится в одноламповом квантроне, энергия импульса на выходе усилителя 1-3 мДж.

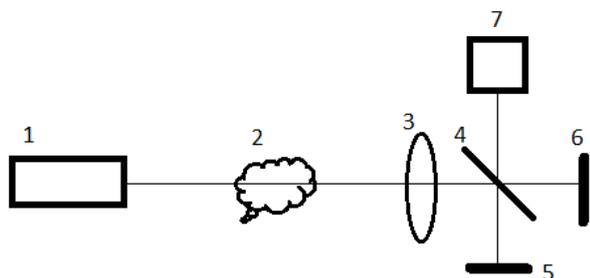
5 – усилитель на YAG  $\varnothing 8 \times 65$  мм. Активный элемент находится в одноламповом квантроне, энергия импульса на выходе усилителя до 100 мДж.

Между усилителями 4 и 5 расположен пространственный фильтр, формирующий пространственное распределение излучения на входе в усилитель 5.

6 – блок генерации гармоник, содержит нелинейные кристаллы КТР длиной 2 мм и KDP длиной 3 мм. Блок предназначен для преобразования частоты лазерного излучения с длиной волны  $\lambda_1=1,06$  мкм в излучение с  $\lambda_2=0,53$  мкм и  $\lambda_3=0,35$  мкм.

7 – интерферометр, будет использоваться цифровой интерферометр, построенный по схеме Маха-Цендера, а также цифровой интерферометр бокового сдвига, построенный по схеме Майкельсона. Описание особенностей программного обеспечения для

обработки цифровых голограмм и получения количественной информации представлено ниже.



1 – лазер с блоком генерации гармоник; 2 – исследуемая плазма;  
3 – линза, строящая изображение исследуемой области на CCD камере;  
4 – светоделитель; 5, 6 – зеркала; 7 – CCD камера

Рисунок 3. Схема интерферометра бокового сдвига

На рисунке 3 показана схема интерферометра бокового сдвига. Зеркала интерферометра развернуты на небольшой угол, при этом из него выходят две волны с небольшим отличием направлений распространения. Волны интерферируют, и каждая волна создает на CCD камере свое изображение. Настройкой интерферометра, можно добиться ситуации, когда два изображения лазерной плазмы, формируемые двумя частями зондирующего импульса, не пересекаются на CCD-матрице. В результате при формировании интерференционной картины в области, где строится изображение лазерной плазмы, полученное одной из интерферирующих волн, вторая волна является неискаженной, и ее можно считать опорной волной при дальнейшей цифровой обработке голограмм.

8 – CCD камера, цифровая камера с внешним управлением, матрица 1000x1000 пикселей, размер пикселя 3-5 мкм.

9 – персональный компьютер, ноутбук с операционной системой Windows.

10 – схема синхронизации, устанавливает временные задержки импульсов запуска лазера, камеры, акустооптического модулятора. Управляется внешними импульсами синхронизации.

11, 12 – блоки ламповой накачки, формируют электрические импульсы накачки ламп лазерных усилителей.

13 – акустооптический модулятор, выполнен на кристалле парателлурита. Модулятор предназначен для выделения микросекундных импульсов из излучения DPSS лазера.

14 – DPSS лазер, непрерывный лазер мощностью 50 мВт, излучающий на длинах волн  $\lambda_1=1,06$  мкм и  $\lambda_2=0,53$  мкм. Лазер предназначен для юстировки схемы измерений и зондирования плазмы в микросекундном диапазоне.

В технике двухэкспозиционной голографической интерферометрии [12, 13] сравниваются голограммы невозмущенного и возмущенного объектов. В цифровой интерпретации метода двухэкспозиционной голографической интерферометрии, алгоритм

цифровой синтеза интерферограммы включает дискретное двумерное преобразование Фурье числового массива голограмм и пространственной фильтрации на основе анализа Фурье-образа голограммы, отображаемой в двумерной плоскости пространственных частот.

Пространственная фильтрация позволяет извлечь область в Фурье-плоскости пространственных частот, представляющих информацию о объектной волне и удалить частоты разрывов и шум, связанные с рассеянием лазерного излучения в оптическом пути интерферометра. После пространственной фильтрации, алгоритм включает в себя обратные преобразования Фурье, генерацию двух сложных численных массивов, представляющих информацию о фазовых фронтах, разделение действительных и мнимых частей численных массивов и строительство дифференциальной цифровой интерферограммы. Затем реализуется алгоритм развертки фазы и моделируется трехмерное изображение дифференциальных фаз объектной волн.

Алгоритм реконструкции цифровых интерферограмм по записанным голограммам аналогичен алгоритму, представленному в работе [14]. Распределение интенсивности  $I(x, y)$  в плоскости записи голограммы  $(x, y)$  определяется квадратом модуля суммы комплексных амплитуд объектной  $O(x, y)$  и опорной  $R(x, y)$  волн [15], а именно:

$$I(x, y) = |R(x, y)|^2 + O(x, y)^2 + R(x, y)O^*(x, y) + R^*(x, y)O(x, y) \quad (2)$$

Последние два члена уравнения содержат информацию, соответствующую амплитуде и фазе объектной волны. Эта информация может быть выделена методом преобразования Фурье с фильтрацией в частотной области. Если внеосевая голограмма записана источником с ограниченной апертурой (в нашем случае в ограниченном пучке), то после ее Фурье-преобразования получаем спектр пространственных частот голограммы с четырьмя составляющими, которые соответствуют членам уравнения (2). Первые два члена образуют нулевой порядок спектра, который локализован в центре двумерной Фурье-плоскости. Третий и четвертый члены уравнения образуют комплексно сопряженные плюс-минус первый порядки спектра, локализованные в области несущей пространственной частоты голограммы и симметрично ей относительно центра. Они соответствуют спектру комплексной амплитуды объектной волны. Если выделить (отфильтровать) одну из этих областей локализации спектра, а затем применить обратное преобразование Фурье, то будет восстановлен фазовый фронт объектной волны (реальный или сопряженный в зависимости от выбранной области фильтрации) в плоскости изображения объекта. В соответствии с этим алгоритм процесс записи и восстановления будет следующий. В первом лазерном импульсе снимается голограмма Г1 (область без

плазмы), затем в следующем импульсе снимается голограмма Г2 (область с плазмой). Далее по голограммам восстанавливаются фазовые фронты Г1 и Г2 и строится двумерный Фурье-спектр, в котором выбирается область восстановления. Обратным Фурье-преобразованием восстанавливаются объектные фазовые фронты, и строится интерферограмма. Далее используется алгоритм развертывания фазы, аналогичный работе [12].

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Детализирована схема гетеродинного интерферометра для определения плотности плазмы в канале нейтрализационного дрейфа ускорителя ионов. Длительность импульса с ферроэлектрического источника составляет около 10 микросекунд. Таким образом, при измерении параметров плазмы необходимо временное разрешение в сотни наносекунд, сравнимое с длительностью пучка на входе в зону дрейфа. Плотность плазмы от улучшенных ферроэлектрических источников составляет  $10^{10} \div 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , в дальнейшем предполагается увеличить до  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Сдвиг фазы лазерного луча при прохождении области нейтрализационного дрейфа составит от  $2 \cdot 10^{-5}$  до  $3 \cdot 10^{-2}$  радиан. Система регистрации интерференционного сигнала должна обеспечить разрешение не менее  $10^{-5}$  радиан.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Waldron W.L., Abraham W.J., Arbelaez D. et al. NDCX-II engineering design // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2014. – V. A733. – P. 226-232.
2. Kaganovich I.D., Davidson R.C., Dorf M.A. et al. Physics of neutralization of intense high-energy ion beam pulses by electrons // Physics of Plasmas. – 2010. – V. 17. – 056703.
3. Roy P.K., Seidl P.A., Anders A. et al. A space-charge-neutralizing plasma for beam drift compression // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A. – 2009. – V. 606. – Iss. 1-2. – P. 22-30.
4. Grim G.R. Principles of Plasma Spectroscopy / in "Fast Electrical and Optical Measurements". Ed. Thompson J.E. Springer Science. – 1986. – P. 885-910.
5. Лукьянов С.Ю. Горячая плазма и управляемый ядерный синтез / М.: Наука, 1975. – 407 с.
6. Кузнецов А.П. Лазерная интерферометрия в диагностике импульсной плазмы: автореферат дис.....доктора физ.-мат наук: 27.03.2013. М.: – 2012. – 45 с.
7. Островская Г.В. Голографическая диагностика плазмы (обзор) // Журнал технической физики. – 2008. – Т. 78. – Вып. 9. – С. 1-28.
8. Lavan M. J., Cadwallender W. K., Deyoung T. F. Heterodyne interferometer to determine relative optical phase changes // Review Scientific Instruments. – 1975. – V. 46. – N 5. – P. 525-527.
9. Steinchen W., Lianxiang Yang. Digital shearography. Theory and application of digital speckle pattern shearing interferometry / SPIE – The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. – 2003. – 330 p.
10. Redkorechev V.I., Kulagin I.A., Gurevich V.S., Gusev M.E., Zakharov Yu.N. Picosecond three-color digital holographic interferometry // Optics and Spectroscopy. – 2009. – V. 107. – N 3. – P. 435-439.
11. Азаматов З.Т., Кулагин И.А., Редкоречев В.И. Исследование фазовых неоднородностей индуцированных в нелинейных материалах фотоники пикосекундными лазерными импульсами // Труды международного семинара «Оптика и фотоника», 12-14 сентября 2012 г., Иссык-Куль, Кыргызстан, С. 11-12.
12. Vest Ch. Holographic Interferometry / New York: Wiley, 1979. – 284 p.
13. Gurevich V.S., Gusev M.E., Redkorechev V.I., Gaponov V.E., Alexeseenko I.V., Isaev A.M., Malov A.N., Zaharov Yu.N. New generation holographic system for industrial testing // Proceedings SPIE. – 2004. – V. 5851. – P. 115-122.
14. Pedrini G., Tiziani H.J., Gusev M.E. Pulsed digital holographic interferometry with 694- and 247-nm wavelengths // Applied Optics. – 2000. – V. 39. – N 2. – P. 246-249.
15. Гуров И.П. Компьютерная обработка интерференционных сигналов на основе алгоритма управляемого фазового сдвига // Оптический журнал. – 1998. – № 10. – С. 38-42.

Для пространственной диагностики плазмы рассмотрены методы двухэкспозиционной цифровой голографической интерферометрии с высоким временным и пространственным разрешением. Временное разрешение будет определяться длительностью лазерных импульсов (300 пс – 10 нс), а пространственное разрешение составит порядка длины волны лазерного излучения. Предполагается использовать излучение с  $\lambda_1=1,06$  мкм,  $\lambda_2=0,53$  мкм и  $\lambda_3=0,35$  мкм. Ультрафиолетовое излучение будет использовано для диагностики плазмы с высокой концентрацией, а инфракрасное излучение – для плазмы с низкой концентрацией. В дальнейшем предполагается разработать программное обеспечение обработки цифровых голограмм для исследования оптических характеристик ионной плазмы, а также плазмы малой плотности в канале ускорителя ионов на основе двухэкспозиционной цифровой голографической интерферометрии.

*Работа выполнена в рамках программы «НУ-Беркли: стратегическая программа исследований критического состояния вещества, перспективных материалов и источников энергии на 2014-2018 гг.».*

**ҮДЕТКІШТЕГІ ИОНДАРДЫҢ НЕЙТРАЛИЗАЦИЯЛЫҚ ЫҒЫСУ КАНАЛЫНДАҒЫ ТЫҒЫЗДЫҒЫ  
ТӨМЕН ПЛАЗМАНЫ ДИАГНОСТИКАЛАУЫНА АРНАЛҒАН ИНТЕРФЕРОМЕТРЛІК ӘДІСТЕРІ**

<sup>1)</sup> М.У. Хасенов, <sup>2)</sup> З.Т. Азаматов, <sup>3)</sup> В.И. Редкоречев, <sup>3)</sup> И.А. Кулагин, <sup>1)</sup> И.У. Надинов,  
<sup>1)</sup> А.О. Уразбаев, <sup>1)</sup> М.И. Кайканов

<sup>1)</sup> *Назарбаев Университет, “National Laboratory Astana” Жеке Мекемесі, Астана, Қазақстан*

<sup>2)</sup> *Өзбекстанның Мирзо Ұлықбек атындағы Ұлттық Университетінің Қолданбалы физика  
Ғылыми-зерттеу институты, Ташкент, Өзбекстан*

<sup>3)</sup> *Өзбекстан Республикасы Ғылым Академиясының Ион-плазмалық және лазерлік  
технологиялар институты, Ташкент, Өзбекстан*

NDCX-II үдеткіштің ерекшелігі иондық шоғының қысуы тығыздығы төмен ( $10^{10}$ - $10^{12}$  см<sup>-3</sup>) плазмада ығысу кезінде кеңістіктік зарядты бейтараптандыру нәтижесінде болып табылады. Үдеткіштегі плазманы интерферометриялық диагностикаландыру ретінде гомодиндық және гетеродиндық әдістері пайдаланылуы мүмкін. Алайда, тығыздығы төмен плазма жағдайда фазалық ығысуы салыстырмалы аз шамада болғандықтан бірінші әдісті қолдану тиімсіз. Иондық үдеткіштің нейтрализациялық ығысу каналындағы плазманың тығыздығын өлшеуге арналған гетеродин интерферометрінің схемасына талдау жасалған.

Плазманы кеңістік диагностикаландыру үшін уақыттық және кеңістік ажыратуы жоғары қосэкспозициялық сандық голографиялық интерферометрия әдістері қарастырылған. Уақыттық ажыратуы лазерлік импульстардың ұзақтығымен (300 пс – 10 нс) анықталады, кеңістік ажыратуы лазерлік сәулесінің толқын ұзындығы шамасымен тен болады. Толқын ұзындығы  $\lambda_1=1,06$  мкм,  $\lambda_2=0,53$  мкм и  $\lambda_3=0,35$  мкм сәулесі қолданылады деп болжаланған. Ультракүлгін сәулесі тығыздығы жоғары, ультракызыл сәулесі тығыздығы төмен плазманы диагностикаландыруға қолданылады.

**INTERFEROMETRIC METHODS OF DIAGNOSTICS OF LOW DENSITY PLASMA  
IN THE CHANNEL OF THE ACCELERATOR WITH NEUTRALIZING DRIFT OF IONS**

<sup>1)</sup> M.U. Khasenov, <sup>2)</sup> Z.T. Azamatov, <sup>3)</sup> V.I. Redkorechev, <sup>3)</sup> I.A. Kulagin, <sup>1)</sup> I.U. Nadinov,  
<sup>1)</sup> A.O. Urazbayev, <sup>1)</sup> M.I. Kaikanov

<sup>1)</sup> *Nazarbayev University, “National Laboratory Astana” PI, Astana, Kazakhstan*

<sup>2)</sup> *The National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek,  
Applied Physics Research Institute, Tashkent, Uzbekistan*

<sup>3)</sup> *Ion-plasma and Laser Technology Institute of the Academy of Sciences  
of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan*

The feature of the NDCX-II accelerator is an ionic beam compression due to neutralization of a spatial charge as a result of drift in the low-density plasma ( $10^{10}$ - $10^{12}$  cm<sup>-3</sup>). There are two methods, which can be used for interferometric plasma diagnostics: homodyne and heterodyne methods. However, due to the relatively small magnitude of the phase shift at low plasma density application of the first method is inefficient. The scheme of the heterodyne interferometer for plasma density determination in the accelerator channel with neutralizing drift of ions is detailed.

For spatial diagnostics of plasma the methods of a two-exposition digital holographic interferometry with high temporary and spatial resolution are considered. The time resolution is determined by the duration of the laser pulse (300 ps - 10 ns), and spatial resolution will make an order of wavelength of laser radiation. It is supposed to use radiation with  $\lambda_1=1.06$   $\mu$ m,  $\lambda_2=0.53$   $\mu$ m and  $\lambda_3=0.35$   $\mu$ m. Ultra-violet radiation will be used for plasma diagnostics with high concentration, and infrared radiation – for low concentration.

УДК 544.64:544.032.4

## СИНТЕЗ И СВОЙСТВА Co – НАНОТРУБОК

<sup>1)</sup> Сейтмагамбет Г., <sup>1,2)</sup> Шлимас Д., <sup>1,2)</sup> Козловский А., <sup>3)</sup> Шумская Е., <sup>3)</sup> Каниюков Е., <sup>1)</sup> Кадыржанов К.К.<sup>1)</sup> Евразийский Национальный Университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан<sup>2)</sup> Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан<sup>3)</sup> НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь

В работе представлены результаты исследования получения полых наноструктур на основе кобальта, полученных методом электрохимического осаждения в поры шаблонных матриц. Методы растровой электронной микроскопии, рентгеновской дефрактометрии и энергодисперсионного анализа были использованы для качественного и количественного анализа размерности, химического состава и кристаллической структуры синтезированных образцов. Показано, что с понижением температуры значения магнитных свойств монотонно уменьшаются. Массивы нанотрубок на основе кобальта имеют перспективное направление в получении магнитных носителей информации, сверхточных сенсоров магнитного поля и оптических устройств.

**Ключевые слова:** трековые мембраны, электрохимическое осаждение, нанотрубки, шаблонный синтез, проводимость нанотрубок.

## ВВЕДЕНИЕ

Уровень современного научно-технического прогресса определяется развитием электроники, в основе которой лежат достижения в различных областях фундаментальных наук: физике твердого тела, кристаллографии, твердотельных технологий. Последние достижения науки показали потенциальные возможности развития микроэлектроники на базе принципиально новых физических и технологических решений связанных с нанотехнологиями. В отличие от традиционной микроэлектроники, где повышение функциональности и быстродействия систем достигается путем увеличения плотности размещения и уменьшением размеров элементов, принцип действия которых не зависит от масштаба, при переходе к наноструктурным объектам возникает качественно новая ситуация основанная на квантовых эффектах. Интерференционные эффекты, туннелирование, размерное квантование оказывают определяющее влияние на физические процессы, протекающие в наноструктурных материалах, а также функциональные свойства устройств на их основе. Применение наноструктурных материалов открывает новые возможности в повышении электропроводности, температурной и радиационной стойкости. Методы получения наноструктур основываются на технологических достижениях в области формирования на атомном уровне структур с заданными оптическими, магнитными и электрическими свойствами. Магнитные свойства наноструктур обладают огромным разнообразием и значительно отличаются от массивного материала. Основной вклад в них вносят размерные эффекты, влияние поверхности и кристаллическая структура [1-3]. Разработанные на данный момент магнитные наносенсоры и ячейки памяти на основе Co, Ni, Fe и их сплавов имеют ряд недостатков, связанных с сильной чувствительностью к температуре, высокой стоимостью, ухудшением технических характеристик [4-7].

Для получения магнитных наноструктур удобно использовать метод шаблонного синтеза. Осаждение металлов в поры шаблонов происходит путем пропускания постоянного тока через раствор электролита, что позволяет получать композитные наноструктуры [1, 5, 7, 8]. Главным достоинством данного метода является возможность контролировать скорость осаждения металлов в поры, путем изменения величины силы тока и приложенного напряжения, а так же временем осаждения [9,10]. Учитывая, что практическое применение магнитных наноструктур ограничивается только отсутствием метода, обеспечивающего возможность контролируемого получения нанотрубок с кристаллической структурой стенок, в работе рассматривается методика получения Co нанотрубок методом шаблонного синтеза, проводится характеристика их морфологических свойств, а также исследуется зависимость магнитных характеристик от температуры. В качестве шаблонов используются трековые мембраны на основе ПЭТФ толщиной 12 мкм с номинальным диаметром пор 110 нм.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

**Химические реактивы**

Сульфат кобальта 7-водный, борная кислота, аскорбиновая кислота производства Sigma, а также все остальные используемые химические реактивы имели чистоту ч.д.а или х.ч. и использовались без дополнительной очистки.

**Приготовление полимерного темплата**

Трековые мембраны были изготовлены из полиэтилентерефталата марки Hostaphan® производства фирмы «Mitsubishi Polyester Film» (Германия). Пленки облучали на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60 (Астана, Казахстан) ускоренными ионами криптона с энергией 1,75 МэВ/нуклон. Для изучения динамики изменения структурных характеристик нанотрубок кобальта в зависимости от температуры

осаждения в качестве шаблонов были использованы ПЭТФ ТМ с плотностью пор  $1 \cdot 10^9$  пор/см<sup>2</sup>. Ультрафиолетовая сенсбилизация облученных трековых мембран проводилась при помощи лампы UV-C с длиной волны излучения 253.7 нм с каждой стороны в течение 30 минут. Ультрафиолетовое излучение приводит к фотоокислению поверхностного слоя полимера, что позволяет получать поры в полимере практически одинакового диаметра. Трансформация образовавшихся в результате облучения латентных треков в поры проводилась посредством двухстороннего химического травления в растворе 2.2 М NaOH при температуре  $85 \pm 1$  °С. Время травления составляло 70 с. Далее полученные трековые мембраны обрабатывались в растворе нейтрализации (1.0% водный раствор уксусной кислоты) и промывались в деионизированной воде. Данные условия и время травления позволили получить трековые мембраны с цилиндрическими порами, не образующими конгломераты скрещенных или слитых пор. В результате применения данных условий травления, диаметр пор не превышал  $110 \pm 5$  нм, толщина шаблонных матриц составила 12 мкм.

#### **Электрохимическое осаждение кобальта в каналы нанопористых ПЭТФ ТМ**

Электрохимическое осаждение в треки шаблонной матрицы проводилось при разности потенциалов 1,5 В в потенциостатическом режиме. Так как шаблонные матрицы являются диэлектриком, для создания проводящего слоя на матрицы, методом магнетронного напыления в вакууме, наносился слой золота толщиной 10 нм, который служил рабочим электродом (катодом) при осаждении. При данных условиях напыления поры в матрице остаются открытыми, что позволяет получать НС в форме нанотрубок (НТ). Состав электролита Co – нанотрубок  $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (120 г/л),  $\text{H}_3\text{BO}_3$  (45 г/л),  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$  (1,5 г/л).

#### **Исследование структуры и свойств НТ**

Исследование структурных характеристик и элементного состава, полученных НТ проводилось с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) Hitachi TM3030 с системой микроанализа Bruker XFlash MIN SVE при ускоряющем напряжении 15 кВ.

Рентгенодифрактометрические исследования проведены на дифрактометре D8 ADVANCE с использованием излучения рентгеновской трубки с Cu-анодом и графитового монохроматора на дифрагированном пучке. Режим работы трубки: 40 кВ, 40 мА. Дифрактограммы записывались в диапазоне углов  $30 - 70^\circ 2\theta$ , шаг  $0,02^\circ 2\theta$ .

#### **Измерение магнитных характеристик Co-нанотрубок**

Магнитные характеристики Co-нанотрубок изучались на универсальной измерительной системе (автоматизированный вибрационный магнитометр) «Liquid Helium Free High Field Measurement System

(Cryogenic LTD)» в интервале магнитных полей  $\pm 3$  Тл в диапазоне температур от 50 К до 300 К.

#### **РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

Одной из особенностей электрохимического осаждения является возможность управления свойствами синтезируемых наноструктур, благодаря использованию пор с заданной геометрией. Так как полимерные матрицы являются диэлектриком и не проводят ток, перед процессом электрохимического осаждения на полученные шаблоны, методом магнетронного напыления в вакууме, наносился слой золота толщиной 10 нм, который служил рабочим электродом (катодом) при осаждении.

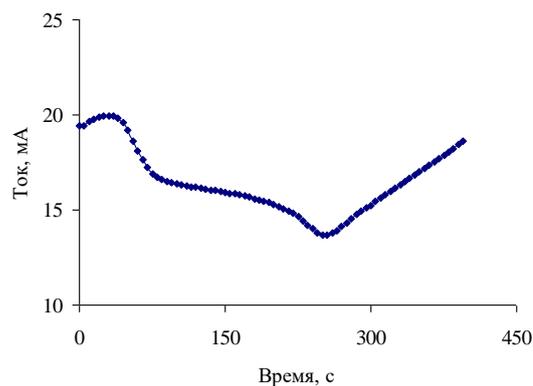
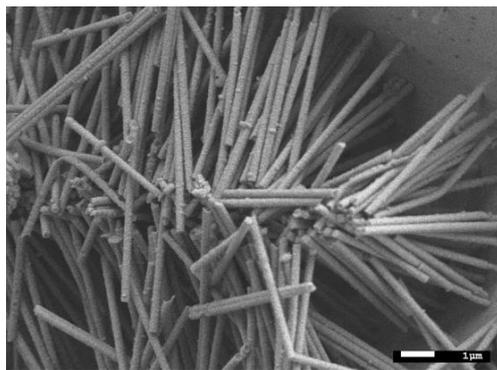


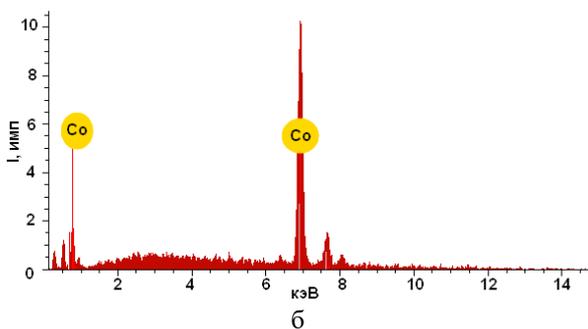
Рисунок 1. Хроноамперограмма процесса получения Co-нанотрубок

На основании полученной экспериментальной хроноамперограммы было определено время осаждения, соответствующее максимальной длине нанотрубок (полному заполнению пор шаблона). Во избежание закупоривания или образования «крышек» на поверхности нанотрубок, предназначенных для изучения структурных и магнитных характеристик, процесс роста нанотрубок был остановлен в начале третьей стадии. Исследование структурных особенностей и морфологии полученных наноструктур проводилось с привлечением РЭМ. РЭМ-изображения нанотрубок представлены на рисунке 2а.

Анализ РЭМ- снимков полученных наноструктур показал, что высота нанотрубок равна толщине шаблона 12 мкм и диаметр  $110 \pm 5$  нм. Из-за недостаточного разрешения РЭМ анализ внутренних диаметров полученных нанотрубок не проводился. Изучение внутренних диаметров находящихся в ПЭТФ шаблонах наноструктур велось манометрическим методом определения газопроницаемости, основанном на измерении изменения давления газа в замкнутой камере при давлениях в интервале от 0,008 до 0,020 МПа с шагом 0,004 МПа. Величина внутреннего диаметра нанотрубок согласно расчетам равна  $70 \pm 5$  нм, соответственно, толщина стенок нанотрубок равна  $20 \pm 2,5$  нм. Таким образом, данные условия осаждения позволяют получать полые нанотрубки с толщиной стенки равной размерам магнитных доменов  $\sim 20$  нм.



а



б

Рисунок 2. а) РЭМ – изображение Co – нанотрубок; б) ЭДА – спектр Co – нанотрубок

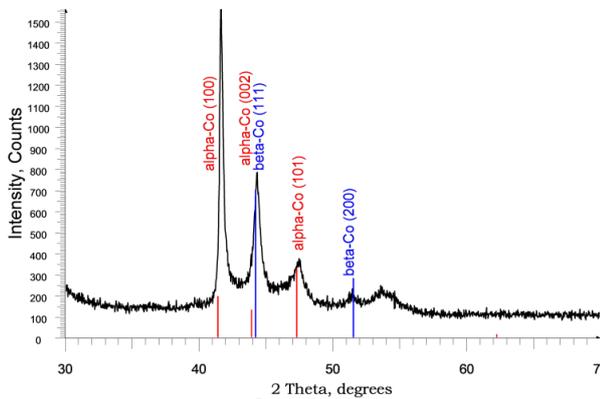


Рисунок 3. Рентгеновская дифрактограмма Co - нанотрубок

Для определения элементного состава Co - нанотрубок был применен метод ЭДА (рисунок 2б). Достоверность количественного анализа достигалась путем снятия пяти спектров в различных областях образца. Атомное соотношение Co - нанотрубок, согласно ЭДА-спектрам исследуемых образцов, составило 99,1%, 0,9% золота соответствует проводящему слою, который напыляется на шаблонную матрицу. Оксидных соединений в структуре нанотрубок не обнаружено, что свидетельствует об отсутствии окислительных и коррозионных процессов в процессе получения, пробоподготовки, а также хранения на воздухе при транспортировке Co - нанотрубок.

Для определения кристаллической структуры Co - нанотрубок был применен метод рентгенофазо-

вого анализа. На дифрактограмме, представленной на рисунке 3, наблюдаются малоинтенсивные пики, характерные для дифракции на наноразмерных материалах. Уширение пиков свидетельствует о поликристаллической структуре Co - нанотрубок.

Анализ дифрактограммы показал, что синтезированные Co - нанотрубки двухфазны: в спектрах присутствует  $\beta$ -Co ГЦК фаза и  $\alpha$ -Co гексагональная примитивная фаза с параметрами кристаллической решетки, отличающимися от эталонных значений. В таблице 1 представлены данные рентгенофазового анализа, параметры ячейки и средний размер кристаллитов, который был рассчитан с применением уравнения Шерера:

$$\tau = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta}, \quad (4)$$

где  $k = 0,9$  – безразмерный коэффициент формы частиц (постоянная Шерера),  $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$  – длина волны рентгеновского излучения,  $\beta$  – полуширина рефлекса на полувысоте (FWHM) и  $\theta$  – угол дифракции (угол Брегга).

Таблица 1. Рентгенодифракционные данные Co - нанотрубок

Образец	2 $\theta^\circ$	(hkl)	Параметр ячейки, \AA	FWHM	L, нм
Co	41.642	(100)	Фазы: $\beta$ -Co ГЦК $a = (3,5428 \pm 0,0012) \text{ \AA}$	0.304	18,11 $\pm$ 0,2
	44.327	(002)		0.495	
	47.500	(101)	$\alpha$ -Co ГП $a = (2,5007 \pm 0,0021) \text{ \AA}$	0.615	
	51.454	(110)	$c = (4,0832 \pm 0,0043) \text{ \AA}$	0.203	

Измерения зависимости намагниченности от приложенного магнитного поля  $M(H)$  для параллельного и перпендикулярного направления поля по отношению к оси НТ проводились при температурах до 50 до 300 К. На вставках к рисункам представлены увеличенные фрагменты петель гистерезиса в полях до 0,4 Тл, на основании которых были определены основные магнитные характеристики НТ ( $H_c$  – коэрцитивность,  $M_r$  – остаточная намагниченность,  $M_s$  – намагниченность насыщения,  $M_r / M_s$  – коэффициент прямоугольности петли гистерезиса), которые приведены в таблице 2.

Величины основных магнитных характеристик Co – нанотрубок монотонно уменьшаются с понижением температуры. Особенно ярко это проявляется в параллельных полях магнитных полей, где значения  $H_c$  уменьшается практически в 2 раза. Известно, что за величину коэрцитивности в магнитных наноструктурах обычно определяют кристаллографическая анизотропия и анизотропия формы. Учитывая высокое аспектное соотношение исследуемых нанотрубок (~100), температурная зависимость  $H_c$  от анизотропии формы должна отсутствовать. Соответственно, различие в значениях коэрцитивности будет являться следствием кристаллической анизотропии кристаллитов Co, формирующих нанотрубок.

Таблица 2. Параметры петель гистерезиса для Co – нанотрубок при двух различных геометриях прикладываемого магнитного поля при различных температурах

Образец	Параллельно НТ				Перпендикулярно НТ			
	$H_c$	$M_r$	$M_s$	$M_r / M_s$	$H_c$	$M_r$	$M_s$	$M_r / M_s$
Co T=50 K	0,081	81	197,3	0,41	0,055	67,1	191,5	0,35
Co T=100 K	0,071	81	197,1	0,41	0,051	67	190,4	0,35
Co T=150 K	0,055	78	196	0,4	0,049	60	184	0,33
Co T=200 K	0,048	66	192	0,34	0,047	60	187	0,32
Co T=250 K	0,055	30	188	0,16	0,046	51	188	0,27
Co T=300 K	0,051	26	187	0,14	0,045	46	188	0,24

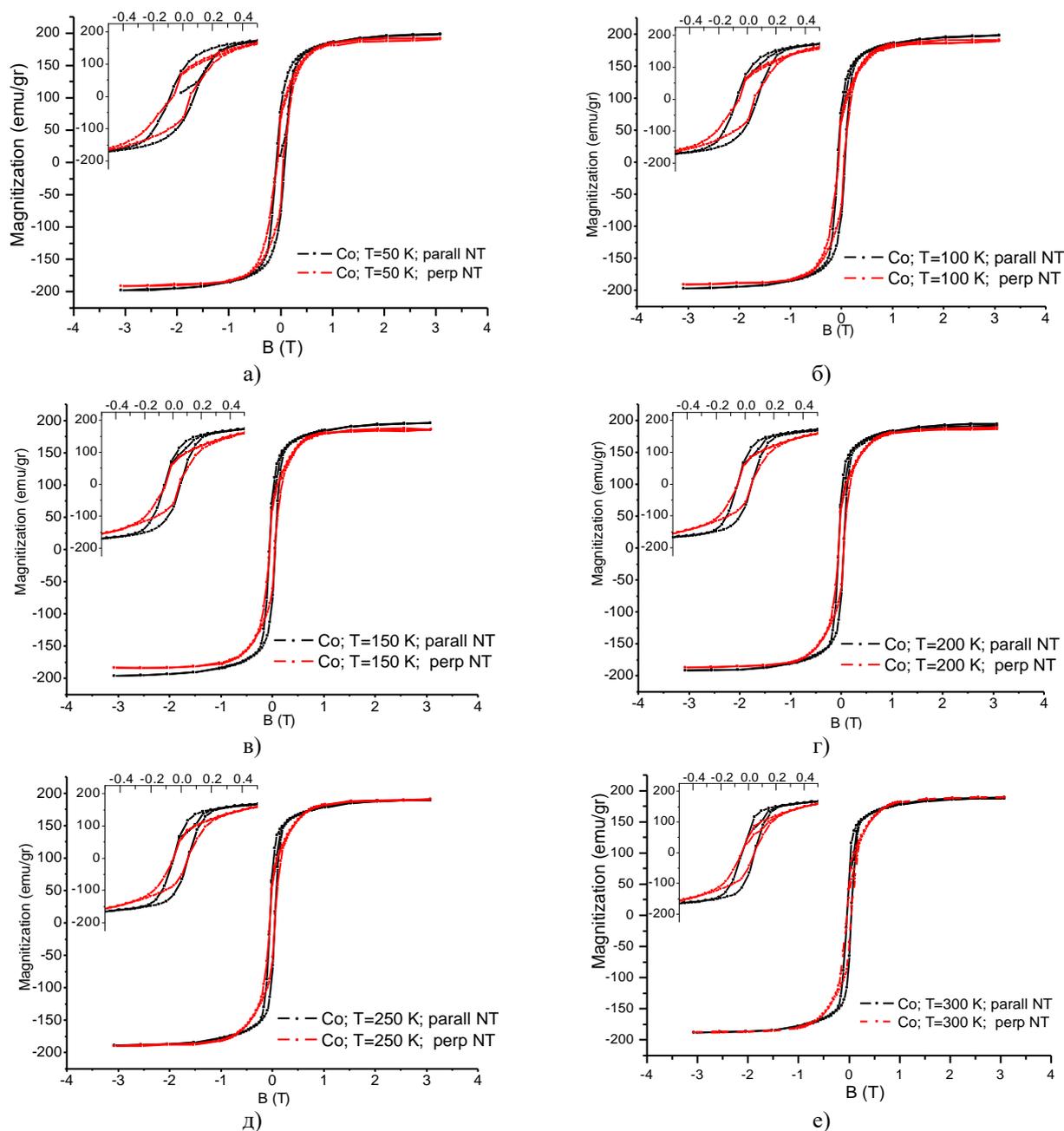


Рисунок 4. Магнитные свойства Co – нанотрубок. Петли гистерезиса массива Co – нанотрубок в ПЭТФ шаблоне для параллельного (черная сплошная линия) и перпендикулярного (красная пунктирная линия) направления поля по отношению к ориентации нанотрубок при температурах: а) 50 K; б) 100 K; в) 150 K; г) 200 K; д) 250 K; е) 300 K

Сравнение магнитных характеристик при различных ориентациях магнитного поля указывает, что значения  $H_{c\parallel}$  и  $M_{r\parallel}/M_{s\parallel}$  несколько выше чем  $H_{c\perp}$  и  $M_{c\perp}/M_{s\perp}$  при температурах до 200 К, после чего  $M_{r\parallel}/M_{s\parallel}$  становится меньше  $M_{r\perp}/M_{s\perp}$ . Изменение соотношения основных магнитных характеристик может свидетельствовать об изменении преобладающего направления магнитной текстуры с изменением температуры.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований были установлены структурные и магнитные характери-

стики Co – нанотрубок полученных методом электрохимического осаждения в порах трековых мембран на основе ПЭТФ. Показано, что исследуемые Co – нанотрубки двухфазны:  $\beta$ -Co ГЦК фаза и  $\alpha$ -Co гексагональная примитивная фаза с параметрами кристаллической решетки, отличающимися от эталонных значений. С понижением температуры величины магнитных свойств монотонно уменьшаются. Таким образом, массивы нанотрубок на основе кобальта имеют перспективное направление в получении магнитных носителей информации, сверхточных сенсоров магнитного поля и оптических устройств.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Huczko A. / Template-based synthesis of nanomaterials / Appl. Phys. A. – 2000. – V.70. – P. 365–376.
2. Duan J. et al. / Magnetic and optical properties of cobalt nanowires fabricated in polycarbonate ion-track templates / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 2009. – V.267. – P. 2567–2570.
3. Sanchez-Barriga J. et al. / Magnetoelectrolysis of Co nanowire arrays grown in a track-etched polycarbonate membrane / Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2007. – V.312. – P. 99–106.
4. Yavuz H., Kaygili O. / The effect of gamma-ray irradiation on the electrical conductivity of  $\text{CuO}_2\text{PbO}$  glasses / Radiat. Eff. Def. Solids. – 2011. – V.166 (2). – P.100–103.
5. Vivas L. G., Ivanov Y. P., Trabada D. G., Proenca M. P., Chubykalo-Fesenko O., Vázquez M. / Magnetic properties of Co nanopillar arrays prepared from alumina templates / Nanotechnology. – 2013. – V.24. – P. 105703.
6. Qin J., Nogués J., Mikhaylova M., Roig A., Muñoz J. S., Muhammed M. / Differences in the magnetic properties of Co, Fe, and Ni 250-300 nm wide nanowires electrodeposited in amorphous anodized alumina templates / Chem. Mater. – 2005. – V.17. – P.1829–1834.
7. Zhou D., Wang T., Zhu M. G., Guo Z. H., Li W., Li F. S. / Magnetic interaction in FeCo alloy nanotube array / J. Magn. – 2011. – V.16. – P.413–416.
8. Ohgai T., Hoffer X., Fabian A., Gravier L., Ansermet J. P. / Electrochemical synthesis and magnetoresistance properties of Ni, Co and Co/Cu nanowires in a nanoporous anodic oxide layer on metallic aluminium / Journal of Materials Chemistry. – 2003. – V.13. – P.2530.
9. Rawtani D., Sajjan T. R., Agrawal Y. K. / Emerging strategies for synthesis and manipulation of nanowires: a review / rev. Adv. Mater. Sci. – 2015. – V.40. – P.177–187.
10. Sarkar J., Khan G. G., Basumallick A. Nanowires. / Properties, applications and synthesis via porous anodic aluminium oxide template / Bull. Mater. Sci. – 2007. – V.30. – P.271–290.

#### Co-НАНОТҮТІКШЕЛЕРДІҢ СИНТЕЗІ ЖӘНЕ ҚАСИЕТТЕРІ

<sup>1)</sup> Г. Сейтмағамбет, <sup>1,2)</sup> Д. Шлимас, <sup>1,2)</sup> А. Козловский, <sup>3)</sup> Е. Шумская,  
<sup>3)</sup> Е. Каниюков, <sup>1)</sup> К.К. Кадыржанов

<sup>1)</sup> Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

<sup>2)</sup> Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

<sup>3)</sup> Беларусь ҒҰА Материалтану ҒПО, Минск, Беларусь

Бұл жұмыста қалыпты матрицалар қуыстықтарына электрохимиялық тұндыру әдісімен жасалған кобальт негізіндегі қуыс наноқұрылымдарды алуының зерттеу нәтижелері ұсынылған. Өлшем, химиялық құрамы және кристалды құрылымдарының сапалық және сандық талдауын жасау үшін растрлық электрондық микроскопия, рентгендық дифрактомерия және энергия-дисперсиялық талдау әдістері қолданылған. Магниттік қасиеттердің температура төмендеген сайын монотонды түрде азаятыны көрсетілген. Кобальт негізделген нанотүтікшелердің массивтерін ақпаратты тасымалдау құрылғылар, сонымен қатар магнит өрісінің жоғары дәлдікті сенсорлар және оптикалық құрылғылар салаларында пайдалану перспективті бағыт болып саналады.

**Түйінді сөздер:** *трек мембраналары, электрохимиялық тұндыру, нанотүтікшелер, үлгілі синтез, нанотүтікшелердің өткізгіштігі.*

**SYNTHESIS AND PROPERTIES OF Co-NANOTUBES**

<sup>1)</sup> G. Seytmagambet, <sup>1,2)</sup> D. Shlimas, <sup>1,2)</sup> A. Kozlovskiy, <sup>3)</sup> E. Shumskaya,  
<sup>3)</sup> E. Kanyukov, <sup>1)</sup> K.K. Kadyrzhanov

<sup>1)</sup> *L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

<sup>2)</sup> *Institute of Nuclear Physics ME RK, Almaty, Kazakhstan*

<sup>3)</sup> *Scientific and Practical Materials Research Center of NAS of Belarus, Minsk, Belarus*

This paper presents the results of the study of hollow cobalt based nanostructures prepared by the method of electrochemical deposition in the pores of template matrix. Methods of scanning electron microscopy, X-ray diffraction and energy dispersive analysis were used for the qualitative and quantitative analysis of dimensions, chemical composition and crystal structure of the synthesized samples. It was shown that with decrease in temperature the value of magnetic properties decreases monotonically. The arrays of cobalt based nanotubes have a promising direction in the areas of magnetic information carriers, high precision magnetic field sensors and optical devices.

**Key words:** *track membranes, electrochemical deposition, nanotubes, template synthesis, nanotube conductivity.*

УДК 621.039.5

## ВОЗМОЖНОСТЬ СОХРАНЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРА ИГР ПРИ КОНВЕРСИИ

Байгожина А.А., Иркимбеков Р.А., Мурзагалиева А.А.

*Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

В статье представлены результаты расчетов возможности перехода реактора ИГР с модернизированной ампулой НА-228 с высокообогащенного уранового топлива на низкообогащенное. Показано, что максимальный флюенс в реакторе с НОУ-топливом будет меньше, чем ожидалось ранее в расчетах без учета разогрева активной зоны.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших проблем, стоящих перед современной прикладной наукой, является обеспечение безопасной и эффективной эксплуатации объектов использования атомной энергии. Среди этих объектов важное место занимают исследовательские ядерные реакторы [1].

В настоящее время в 52 странах действует около 350 исследовательских реакторов мощностью от менее 1 Вт до 100 МВт и выше. Эти реакторы используются во всех областях науки и техники. Сегодня они используются, главным образом в таких областях как фундаментальные исследования, производство радиоактивных изотопов, нейтронно-активационный анализ и испытание материалов.

При оценке практических возможностей перевода существующих исследовательских реакторов на использование топлива с низкообогащенным ураном должны приниматься во внимание три фактора:

- запас безопасности и надежность топлива не должны быть ниже, чем для существующих в настоящее время конструкций, основанных на применении высокообогащенного топлива;
- не должны выдвигаться требования существенного изменения конструкции реактора;
- не должно быть превышения допустимых потерь рабочих характеристик реактора (т.е. потока на единицу мощности) и увеличения эксплуатационных расходов.

### 1. ОПИСАНИЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КАНАЛА РЕАКТОРА ИГР

Реактор ИГР [2] – импульсный исследовательский ядерный реактор на тепловых нейтронах с гомогенной уран-графитовой активной зоной.

Исследовательский реактор ИГР имеет два вертикальных экспериментальных канала: центральный экспериментальный канал (ЦЭК) и боковой экспериментальный канал (БЭК). ЦЭК и БЭК оснащены водоохлаждаемыми экспериментальными устройствами (неподвижными ампулами НА-228 и НА-82). неподвижные ампулы предназначены для герметизации газовой полости реактора и защиты объектов испытаний от термического воздействия активной зоны реактора.

Основные элементы неподвижной ампулы (рисунок 1): ампула внутренняя (рисунок 1, поз. 1); кожух разделительный (рисунок 1, поз. 2); кожух наружный (рисунок 1, поз. 3).

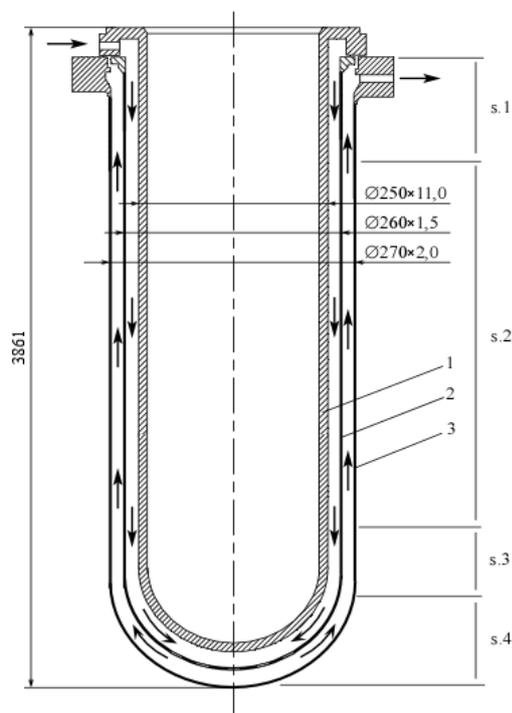
Конструктивно неподвижная ампула представляет собой три вставляемых один в другой цилиндрических элемента: наружный и разделительный кожухи и внутренняя ампула. Разделительный кожух имеет в донной части перепускные отверстия.

Кожух наружный – это составной элемент неподвижной ампулы, используемой для образования экспериментальной полости – центрального экспериментального канала реактора ИГР. Внешний кожух изготовлен из циркониевого сплава Э-125. Циркониевый сплав обладает высокой «прозрачностью» для тепловых нейтронов; достаточной стойкостью к коррозионному воздействию воды, пара и реакторных сред при рабочих давлениях и температурах; высокой теплопроводностью; хорошей химической совместимостью с ядерным топливом; приемлемой механической прочностью и пластичностью при облучении при повышенных температурах [3].

Внутренняя ампула и разделительный кожух неподвижной ампулы изготовлены из алюминиевого сплава АМг-6, а наружный кожух имеет более сложную конструкцию: фланец и первые три кольца (рисунок 1, секция s.1, высота 900 мм) изготовлены из титанового сплава ВТ1-0; далее, кожух сварен из колец (рисунок 1, секция s.2, высота 2800 мм), изготовленных из циркониевого сплава Э125; нижнее кольцо (рисунок 1, секция s.3, высота 45 мм) изготовлено из титанового сплава ВТ1-0, а донная часть (рисунок 1, секция s.4, высота 45 мм) отштампована из титанового сплава ОТ-4 [4].

На поверхности разделительного кожуха сверху вниз на равном расстоянии наварены по окружности три ряда дистанционирующих пластин, обеспечивающих необходимый зазор для прохода воды. Вода на охлаждение неподвижной ампулы подается по двум штуцерам du20 во фланце внутреннего кожуха, опускается вниз по щелевому зазору, образованному внутренней ампулой и разделительным кожухом, через отверстия в днище разделительного кожуха поступает в щелевой зазор, образованный разделительным и наружным кожухами, поднимается по не-

му и через два штуцера  $\text{d}_{\text{у}20}$  во фланце наружного кожуха сбрасывается в трубопровод замкнутого контура.



1 – внутренний кожух; 2 – разделительный кожух; 3 – наружный кожух

Рисунок 1. Неподвижная ампула центрального экспериментального канала реактора ИГР

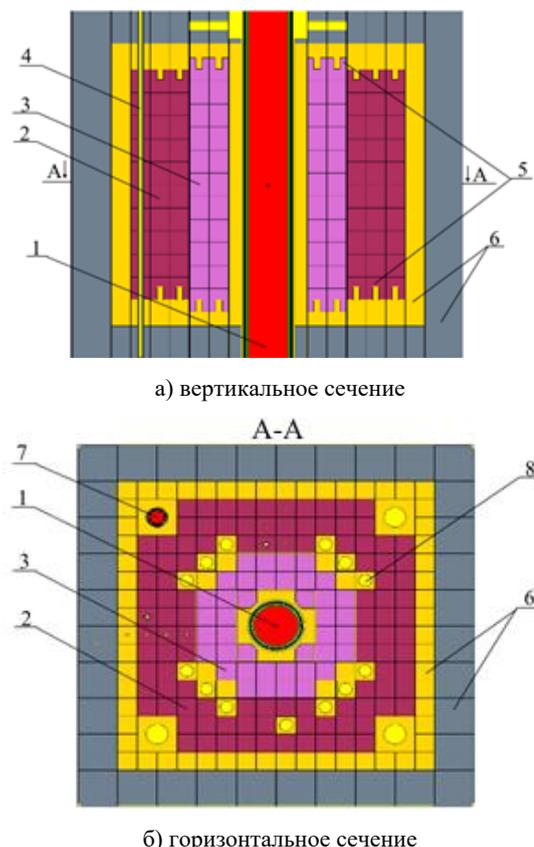
## 2. ПЕРЕХОД РЕАКТОРА ИГР С ВЫСОКО-ОБОГАЩЕННОГО НА НИЗКООБОГАЩЕННОЕ УРАНОВОЕ ТОПЛИВО

Расчетная конфигурация реактора ИГР [2] для программы MCNP5 максимально соответствует реальной конструкции реактора. В конфигурации реактора заданы зазоры между колоннами кладки в активной зоне и в отражателе, задана переменная концентрация урана по топливным блокам. Подвижная и неподвижная части кладки активной зоны, а также блоки на их стыке, разделены на 4 четверти перпендикулярными плоскостями, проходящими через центр экспериментального канала (рисунок 2).

Каждая четверть разделена по высоте на 11 слоев в подвижной и 10 слоев в неподвижной частях кладки (рисунок 2, пп. 2, 3). Высота каждого слоя – 13,3 см. Общее число элементов разбиения составляет 124 ячейки.

Для реактора ИГР выполнена предварительная оценка возможности снижения обогащения топлива по урану-235 с существующих 90 % до 20 %, при этом нейтронно-физические и тепловые расчеты реактора выполнены с использованием расчетных моделей, верифицированных по параметрам реактора ИГР с высокообогащенным ураном [5]. Применение одних и тех же расчетных моделей для реактора ИГР с высокообогащенным (ИГР-ВОУ) и низкообо-

гащенным ураном (ИГР-НОУ) стало возможным в связи с тем, что по результатам рассмотрения вариантов конструкции активной зоны с низкообогащенным топливом предпочтение отдано варианту с сохранением существующей конструктивно-размерной схемы реактора [6].



1 – центральный экспериментальный канал; 2 – неподвижная часть кладки; 3 – подвижная часть кладки; 4 – канал источника нейтронов; 5 – слои топлива; 6 – отражатель; 7 – боковой экспериментальный канал; 8 – канал стержня регулирования

Рисунок 2. Горизонтальное и вертикальное сечения расчетной модели реактора ИГР-ВОУ

Для изучения возможности конверсии реактора ИГР проведены расчеты по определению изменения потока тепловых нейтронов в центральном экспериментальном канале для «холодного» и «горячего» состояний реактора.

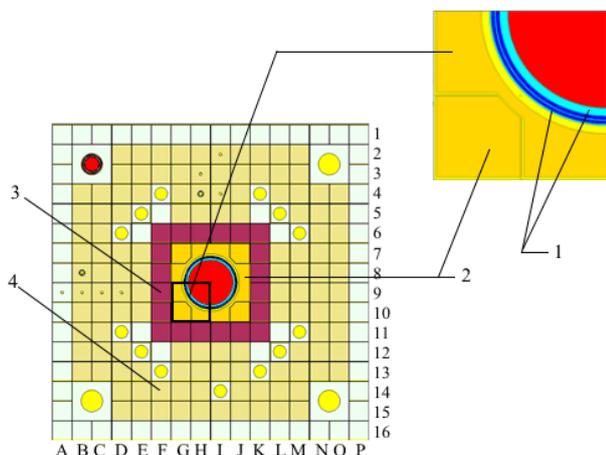
В модели реактора ИГР в «холодном» состоянии температура топливных блоков равна 293,6 К. В модели реактора ИГР для «горячего» состояния на топливные блоки задана температура 1200 К. Графитовые блоки, прилегающие к активной зоне, более подвержены нагреванию, на них задана температура 600 К.

В отчете [6] рассмотрен следующий вариант конверсии реактора ИГР-ВОУ на низкообогащенный уран (вариант №6):

– в составе активной зоны используются два вида топливных блоков, отличающиеся concentra-

## ВОЗМОЖНОСТЬ СОХРАНЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРА ИГР ПРИ КОНВЕРСИИ

цией урана в графите при одинаковом обогащении. Концентрация урана в топливных блоках, прилегающих к ЦЭК равна 1,34 % (рисунок 3, поз.3), концентрация топливных блоков активной зоны 2,65 % (рисунок 3, поз.2). Обогащение урана соответствует 19,75 %;

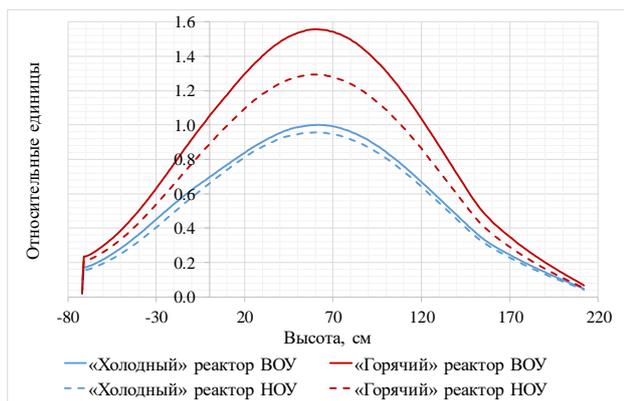


1 – кожух из циркония; 2 – окись бериллия; 3 – топливные блоки, прилегающие к ЦЭК; 4 – топливные блоки активной зоны

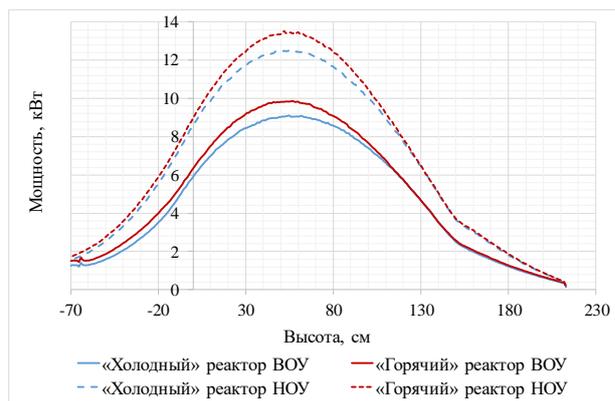
Рисунок 3. Расчетная модель реактора ИГР с низкообогащенной зоной

Таблица 1. Нейтронно-физические параметры реактора ИГР для различных конфигураций активной зоны

Состояние реактора		Коэффициент размножения, $k_{eff}$	Запас реактивности, $\rho$	Поток тепловых нейтронов в ЦЭК (ИГР-НОУ/ИГР-ВОУ)
«Холодный» реактор	ИГР-ВОУ	1,23795	28,06	0,953
	ИГР-НОУ	1,18025	22,29	
«Горячий» реактор	ИГР-ВОУ	1,09768	12,99	0,831
	ИГР-НОУ	1,06942	9,48	



а) распределение потока тепловых нейтронов в ампуле ЦЭК



б) распределение мощности в ЦЭК

Рисунок 4. Распределение потока тепловых нейтронов и мощности в ЦЭК реактора ИГР

При переходе с высокообогащенного на низкообогащенное топливо поток тепловых нейтронов в «холодном» состоянии реактора уменьшается на 5 % (рисунок 4, а, синяя пунктирная линия). В отчете [6] уменьшение потока тепловых нейтронов в ЦЭК (вариант №6) оценивалось в 3 %. Изменение

- геометрические размеры реактора и его составляющих остались неизменными;
- в конструкции центрального экспериментального канала два алюминиевых кожуха заменены на циркониевые;
- крестовина ЦЭК, а также четыре колонны (G7, G10, J7, J10) изготовлены из окиси бериллия (BeO) вместо графита (рисунок 3).

Для расчета распределения потока тепловых нейтронов в ЦЭК проведены нейтронно-физические расчеты с использованием программы MCNP5 с базой библиотек ENDF/B-VII.0 [7].

Вычислены коэффициенты размножения тепловых нейтронов в ЦЭК с извлеченными стержнями из активной зоны реактора ИГР. Результаты нейтронно-физических расчетов приведены в таблице 1.

Распределение потока тепловых нейтронов в ампуле ЦЭК реактора ИГР представлено на рисунке 4, а. Расчеты распределения плотности потока тепловых нейтронов в экспериментальных каналах был выполнен для реактора, когда из активной зоны извлечены все стержни регулирования и подвижная часть кладки (ПЧК) находится в верхнем положении.

Распределение мощности в ЦЭК реактора ИГР представлено на рисунке 4, б.

нейтронов увеличится на 52 % (рисунок 4, а, красная сплошная линия).

При переходе из «холодного» состояния реактора с ВОУ топливом в «горячее» состояние с НОУ топливом поток тепловых нейтронов увеличится на 28 % (рисунок 4, а, красная пунктирная линия).

#### Определение флюенса тепловых нейтронов

Большая разница между характеристиками потока тепловых нейтронов в «холодном» и «горячем» состоянии реактора требует оценки отношения флюенсов тепловых нейтронов при реализации полного интеграла мощности реактора ИГР-НОУ к ИГР-ВОУ.

Для нахождения флюенса тепловых нейтронов  $F$  при полном интеграле мощности, необходимо знать, как изменяется поток тепловых нейтронов во времени. Для этого предполагается, что реактор работает на постоянной мощности в течение времени  $\tau$ , а поток в канале неподвижной ампулы растет линейно по времени от значения потока в «холодном» состоянии реактора  $\varphi_1$  в начальный момент времени, до значения потока в «горячем» состоянии реактора  $\varphi_2$  в момент времени  $t = \tau$ . Запишем функцию изменения потока тепловых нейтронов:

$$\varphi(t) = \varphi_1 + xt, \quad (1)$$

$$\varphi(\tau) = \varphi_2, \quad x = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\tau}. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим:

$$\varphi(t) = \varphi_1 + \left( \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\tau} \right) t. \quad (3)$$

Интегрируем (3) по времени:

$$\begin{aligned} F &= \int_0^{\tau} \varphi(t) dt = \int_0^{\tau} \left( \varphi_1 + \left( \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\tau} \right) t \right) dt = \\ &= \varphi_1 \tau + \left( \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\tau} \right) \tau^2 = 0,5\tau(\varphi_1 + \varphi_2). \end{aligned}$$

Значения для  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  (поток тепловых нейтронов в ЦЭК для реактора ИГР в «холодном» и «горячем» состоянии с низкообогащенным и высокообогащенным топливом) получены с помощью программы MCNP5. Найдем отношение флюенсов в области максимума потока тепловых нейтронов (ИГР-НОУ/ИГР-ВОУ):

$$\begin{aligned} \frac{F_{НОУ}}{F_{ВОУ}} &= \frac{0,5\tau(\varphi_{1НОУ} + \varphi_{2НОУ})}{0,5\tau(\varphi_{1ВОУ} + \varphi_{2ВОУ})} = \frac{\varphi_{1НОУ} + \varphi_{2НОУ}}{\varphi_{1ВОУ} + \varphi_{2ВОУ}} = \\ &= \frac{0,955 + 1,294}{1,000 + 1,557} = 0,880. \end{aligned}$$

При переходе реактора с ВОУ топливом из «холодного» состояния в «горячее» мощность увеличится на 7 % (рисунок 4, б, красная сплошная линия).

При переходе с высокообогащенного топлива на низкообогащенное, мощность в «холодном» состоянии реактора, увеличится на 41 % (рисунок 4, б, синяя пунктирная линия).

При переходе из «холодного» состояния реактора с ВОУ топливом в «горячее» состояние с НОУ топливом мощность увеличится на 49 % (рисунок 4, б, красная пунктирная линия).

### 3. РАСЧЕТ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НЕПОДВИЖНОЙ АМПУЛЫ НА-228

Проведен теплогидравлический расчет неподвижной ампулы центрального экспериментального канала реактора ИГР. Для проведения расчета по определению тепло-гидравлических характеристик канала построена трехмерная модель в программном коде GAMBIT (рисунок 5).

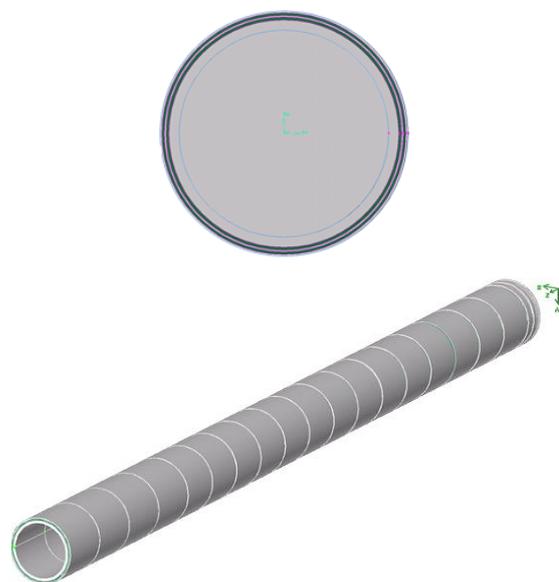


Рисунок 5. Расчетная модель

В модели внутренняя ампула, разделительный и центральный кожухи представлены в виде цилиндров, омываемых водой. Схема подачи воды в модели соответствует схеме, показанной на рисунке 1.

В зазор между ампулой и разделительным кожухом вода подается сверху с расходом 4,5 кг/с и температурой  $T_0=293$  К (вход). Снизу вода поступает в зазор между разделительным и наружным кожухом и поднимается вверх (выход).

Расчет модели проведен для нестационарного режима с помощью программного комплекса ANSYS 14.5.7 [8]. Принято, что реактор ИГР работает в предельно возможном режиме на мощности в 1 ГВт в течение 5,2 с.

Для задания высотного распределения энерговыделения в модели каждая секция ампулы разбита по высоте на части по 20 см. Высотное распределение энерговыделения предварительно рассчитано в программном коде MCNP5 и представлено в таблице 2.

**ВОЗМОЖНОСТЬ СОХРАНЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
РЕАКТОРА ИГР ПРИ КОНВЕРСИИ**

Таблица 2. Распределение энерговыведения

	Наружный циркониевый кожух, Вт/м³	Разделительный кожух и внутренняя ампула, Вт/м³
секция s.1	2.94E+06	7.15E+05
секция s.2	9.55E+06	2.17E+06
	3.16E+07	6.75E+06
	5.47E+07	1.15E+07
	9.81E+07	1.94E+07
	1.73E+08	3.26E+07
	2.34E+08	4.36E+07
	2.76E+08	5.11E+07
	2.93E+08	5.43E+07
	2.85E+08	5.27E+07
	2.52E+08	4.68E+07
	1.96E+08	3.67E+07
	1.21E+08	2.32E+07
	6.91E+07	1.37E+07
	3.88E+07	8.09E+06
секция s.3	1.79E+07	3.92E+06
секция s.4	1.79E+07	3.92E+06

На наружной поверхности происходит конвекция с коэффициентом теплоотдачи 15 Вт/м²·К, который рассчитывается следующим образом:

$$q = \frac{\lambda}{d},$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности гелия;  
d – толщина канала.

Исходные данные для проведения расчетов приведены в таблице 3.

Таблица 3. Исходные данные

Параметр	Значение
Расход теплоносителя, кг/с	4,5
Давление на входе, атм	15
Температура теплоносителя на входе, К	293
Время, с	5,2

Для оценки теплового состояния исходной ампулы и модернизированной ампулы измерены значения среднемассовой температуры теплоносителя на выходе на каждой секунде расчета. Результаты расчета приведены в таблице 4.

На рисунке 6 представлена динамика разогрева теплоносителя исходной ампулы и модернизированной ампулы.

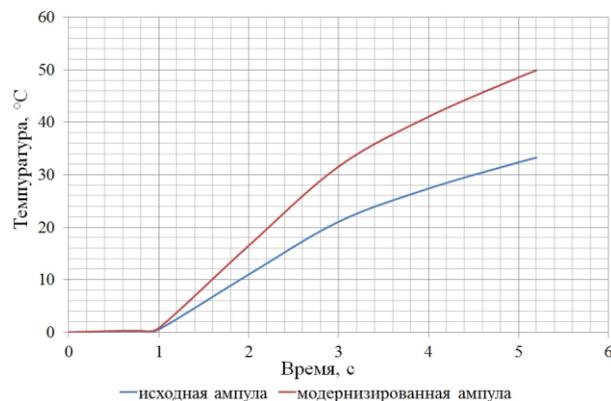


Рисунок 6. Изменение температуры теплоносителя на выходе

Таблица 4. Подогрев отдельных частей исходной ампулы / модернизированной ампулы, °C

	Ампула	Разделительный кожух	Наружный циркониевый кожух
секция s.1*	0.6 / 1.1	19.6 / 35.3	31.0 / 41.0
	1.1 / 1.9	21.8 / 39.2	33.0 / 43.0
	2.0 / 3.6	23.1 / 41.6	35.4 / 45.5
	3.7 / 6.7	25.5 / 45.9	38.7 / 48.8
секция s.2**	7.9 / 14.2	26.7 / 48.1	43.3 / 53.4
	14.8 / 26.6	29.0 / 52.2	51.6 / 61.8
	23.7 / 42.7	30.5 / 54.9	62.2 / 72.4
	38.4 / 69.1	32.5 / 58.5	80.1 / 90.3
	56.0 / 100.8	34.3 / 61.7	109.1 / 119.4
	69.8 / 125.6	35.6 / 64.1	130.9 / 141.2
	79.3 / 142.7	36.1 / 64.9	144.5 / 154.8
	83.1 / 149.6	36.2 / 65.2	149.0 / 159.3
	82.2 / 147.9	35.4 / 63.7	140.7 / 150.9
	76.8 / 138.2	33.9 / 61.0	130.2 / 140.4
	66.4 / 119.5	32.1 / 57.8	102.1 / 112.3
	50.4 / 90.7	29.9 / 53.8	68.5 / 78.2
	35.5 / 63.9	28.2 / 50.8	47.9 / 58.1
	25.2 / 45.4	27.0 / 48.6	36.0 / 46.1
секция s.3***	19.1 / 34.4	26.2 / 47.2	28.7 / 38.7
секция s.4***	19.4 / 34.9	26.5 / 47.7	40.6 / 50.6

\* длина сегмента 240 мм;

\*\* длина сегмента 200 мм;

\*\*\* длина сегмента 45 мм.

На рисунке 7 показано распределение температурного поля в элементах конструкции.

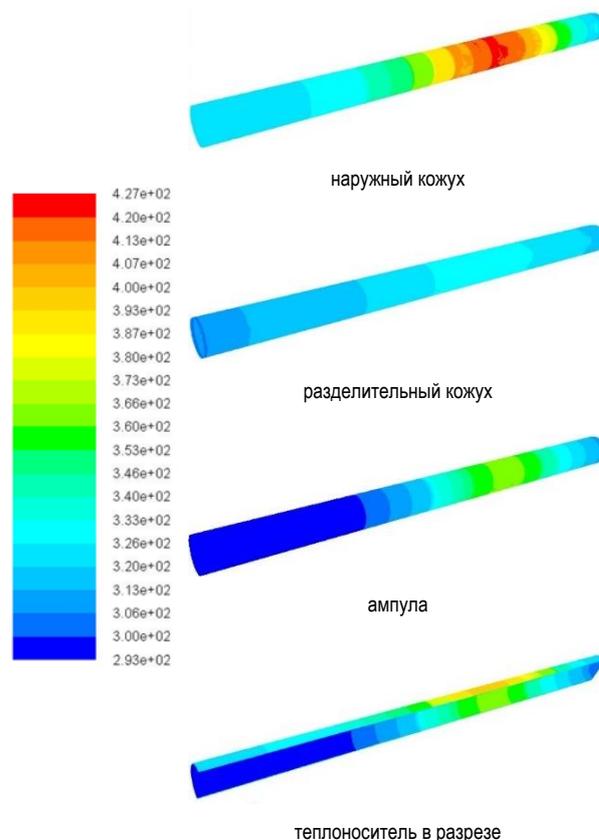


Рисунок 7. Распределение температурного поля

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате проведенных нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов модернизированного внешнего кожуха неподвижной ампулы ЦЭК можно выделить следующее:

Расчетные исследования конверсии реактора ИГР с модернизированной ампулой НА-228 показали, что поток тепловых нейтронов в ЦЭК с НОУ-топливом будет меньше, чем в существующем реакторе, от 4,7 % в «холодном» и до 17% в «горячем» реак-

торе. Максимальный флюенс в реакторе с НОУ-топливом будет меньше, чем ожидалось ранее в расчетах без учета разогрева активной зоны на 12 %.

В результате проведенных расчетов в модернизированной ампуле возможен перегрев. Результаты теплогидравлических расчетов исходной ампулы показывают, что температуры всех элементов ампулы ниже допустимых значений даже в самом максимальном режиме работы реактора.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Ванев, Ю.Е. Развитие методов расчетного сопровождения эксплуатации исследовательских реакторов с применением прецизионных программ: автореф. дис. ... доктор техн. наук: 05.13.18.– Москва, 2014. – 42 с.
2. Описание реактора ИГР: отчет (Deliverable 1.1 under Contract 0J-30461-0001A) / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК; А.Д. Вурим, А.А. Колодешников, В.А. Гайдайчук.– Курчатов, 2011. – 40 с.
3. Синев, Н.М. Экономика атомной энергетики: основы технологии и экономики ядерного топлива / Н.М. Синев, Б.Б. Батуров.– М.: Энергоатомиздат, 1984.– 390 с.
4. Чиркин, В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: справочник.– Атомиздат, Москва, 1968. – 484 с.
5. Характеристики активной зоны реактора ИГР с высокообогащенным ураном: отчет (Deliverable 1.2 under Contract 0J-30461-0001A) / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК; рук. А.А. Колодешников, А.Д. Вурим, В.А. Зуев.– Курчатов, 2011. – 23 с.
6. Характеристики активной зоны реактора ИГР с низкообогащенным ураном: отчет (Deliverable 1.3 under Contract 0J-30461-0001B) / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК; рук. А.А. Колодешников, А.Д. Вурим, В.А. Зуев.– Курчатов, 2012. – 21 с.
7. MCNP-5.1.40 Monte-Carlo N-Particle Transport Code; Los Alamos National Laboratory; Los Alamos, New Mexico. – April 24, 2003.
8. ANSYS, Inc. Products Release 14.5.7, 2013.

## **ИГР РЕАКТОРЫНЫҢ КОНВЕРСИЯ КЕЗІНДЕ ПАЙДАЛАНУШЫЛЫҚ СИПАТТАРЫН САҚТАУ МҮМКІНДІГІ**

**А.А. Байгожина, Р.А. Иркимбеков, А.А. Мурзагалиева**

*ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан*

Мақалада НА-228 жаңартылған ампуласы бар ИГР реакторының жоғары байытылған уран отынынан төмен байытылғанға ауысу мүмкіндігінің нәтижелері берілді. Көрсеткендей, ҒБУ-отыны бар реактордағы максималды флюенсі активтік зонаны қыздыруды есепке алусыз есептемелерде ертеректе күтілгендегіден қарағанда төмен болады.

## **POSSIBILITY TO MAINTAIN OPERATING CHARACTERISTICS OF IGR REACTOR DURING CONVERSION**

**A.A. Baygozhina, R.A. Irkimbekov, A.A. Murzagaliyeva**

*Institute of Atomic Energy Branch of the RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

The paper presents the computation data regarding possible conversion of the IGR research reactor with upgraded ampule NA-228 from HEU fuel to LEU fuel. It is shown that maximal fluence in the reactor with LEU fuel will be less than it was expected in previous computations without taking into account heating of the reactor core.

УДК 621.039.68

## РАСЧЕТ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИСПЫТАНИЙ ТОПЛИВА БЫСТРОГО РЕАКТОРА СО СВИНЦОВО-ВИСМУТОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Витюк Г.А., Котов В.М., Витюк В.А., Жанболатов О.М.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Статья посвящена вопросам расчетного обоснования испытаний топливных элементов быстрого реактора со свинцово-висмутовым теплоносителем в исследовательском импульсном графитовом реакторе. Планируемые эксперименты направлены на изучение фрагментации топливных таблеток. В качестве материала таблеток рассматриваются два варианта: смешанное уран-плутониевое оксидное топливо (МОКС) и диоксид урана. Испытания выполняются в составе разработанного внутриреакторного экспериментального устройства, обеспечивающего требуемые нейтронно-физические характеристики исследуемых твэлов. В работе представлены результаты расчета теплогидравлических характеристик устройства в экспериментах, продемонстрирована возможность достижения заданных тепловых параметров твэла в процессе испытаний. Выполнена оценка времени, необходимого для достижения фрагментации топливных таблеток при стационарной мощности твэла, рассмотрена возможность продолжения эксперимента до частичного расплавления топливных таблеток при реализации вспышки мощности в топливе.

### Задачи испытаний топлива

На современном этапе развития атомной энергетики одним из перспективных направлений является разработка быстрых реакторов IV поколения, физические основы которых позволяют достичь высоких уровней экономичности, ядерной безопасности, улучшенных условий нераспространения, значительного снижения наработки радиоактивных отходов и использования природных запасов урана.

В настоящее время сформирован Международный консорциум организаций, которые привлекаются к созданию многофункционального реактора MYRRHA (Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications) с быстрым энергетическим спектром нейтронов и свинцово-висмутовым теплоносителем, способным работать в подкритическом и критическом режимах. Одним из участников этой программы является Национальный ядерный центр Республики Казахстан, на базе которого планируется проведение реакторных испытаний топлива MYRRHA.

Одним из вопросов, рассматриваемых в рамках анализа безопасности реактора, является блокировка сечения в тепловыделяющей сборке (ТВС), приводящая к нарушению условий теплообмена между твэлами и теплоносителем. Причиной блокировки сечения теплоносителя может быть фрагментация топлива, вызванная локальным скачком мощности, сопровождаемая разрушением оболочки и последующим выходом частиц топлива в теплоноситель [1]. Если оболочка твэла разрушена, то эти фрагменты окажутся в потоке теплоносителя и могут заблокировать сечение ТВС. Размер осколков сильно влияет на процесс развития блокировки, поскольку маленькие фрагменты могут быть смыты, а крупные – заблокировать каналы ТВС.

Задачей планируемых экспериментов с твэлами реактора MYRRHA в импульсном графитовом реак-

торе (ИГР) является, во-первых, определение параметров фрагментации таблеток, а, во-вторых, исследование поведения фрагментированного топлива в условиях резкого скачка мощности.

Принимая во внимание большой опыт по производству топлива из смешанных оксидов плутония и урана (МОКС-топлива), существующий в Европе, этот тип топлива является основным кандидатом на использование в реакторе MYRRHA. Преимуществом МОКС-топлива являются высокие нейтронно-физические свойства такого топлива в спектре быстрых нейтронов. Вместе с тем, в проекте рассматривается возможность использования диоксида урана. Максимальная линейная мощность твэла MYRRHA составляет ~ 250 Вт/см, что эквивалентно удельной мощности 103 Вт/г. [2] Распределение удельной мощности по высоте топливного сердечника представлено на рисунке 1.

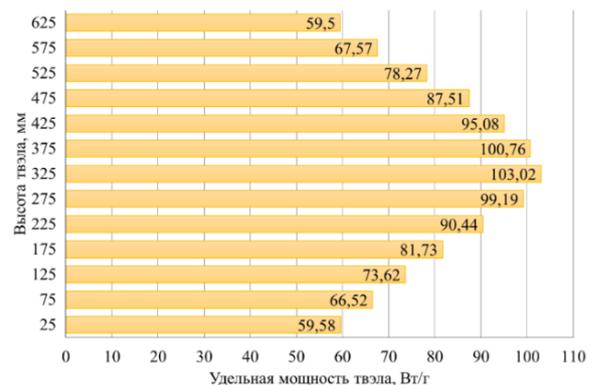


Рисунок 1. Распределение удельной мощности по высоте твэла MYRRHA

**РАСЧЕТ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИСПЫТАНИЙ ТОПЛИВА  
БЫСТРОГО РЕАКТОРА СО СВИНЦОВО-ВИСМУТОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ**

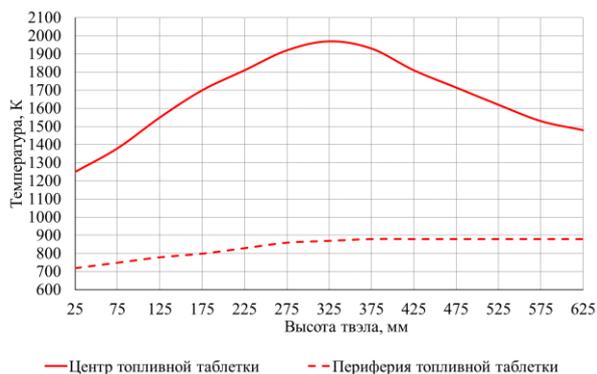


Рисунок 2. Температурный профиль ТВЭЛ реактора MYRRHA

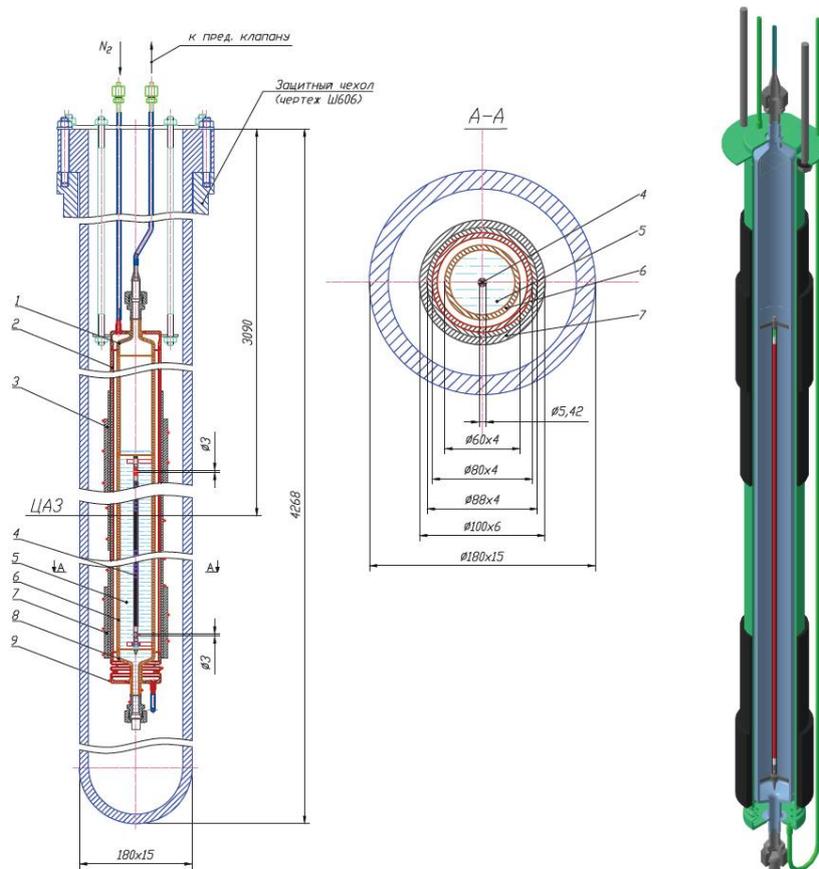
Температурный профиль на поверхности и в центре ТВЭЛ по высоте ТВС представлен на рисунке 2.

Температура плавления МОКС-топлива уменьшается с повышением доли оксида плутония и с увеличением выгорания. При использовании свежего МОКС-топлива ( $(U_{0.7}Pu_{0.3})O_2$ ) температура плавления составляет 2730 °С. При выгорании в 100 МВт×сут/кг тяжелого металла температура плавления снизится до 2410 °С. Проектная максимальная температура должна быть ниже этих пределов. Для

того, чтобы держать топливо достаточно далеко от пластичного состояния, максимальная рабочая температура обычно выбирается ниже чем  $0,9 \times T_{пл}$ . [3]. В процессе работы реактора MYRRHA на номинальной мощности максимальная температура топлива достигает ~ 2073 К [4]. Высокий радиальный температурный градиент в топливной таблетке (рисунок 3) может вызывать растрескивание топлива, особенно сильно этот эффект может проявиться в облученном топливе.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО**

На основании предварительного анализа была определена оптимальная, с точки зрения обеспечения требуемых нейтронно-физических характеристик, конструкция устройства для испытаний ТВЭЛ с МОКС-топливом и с топливом из диоксида урана в реакторе ИГР. В состав устройства (рисунок 3) входит защитный чехол, защищающий экспериментальный канал реактора от высокотемпературного воздействия со стороны испытываемого топлива, и капсула, предназначенная для размещения в ее полости модельного ТВЭЛ и теплоносителя, представляющего собой эвтектический сплав, состоящий из 44,5 % свинца и 55,5 % висмута.



1 – верхний фланец капсулы, 2 – чехол охлаждения, 3 – верхний поглотитель, 4 – ТВЭЛ, 5 – свинцово-висмутая эвтектика, 6 – цилиндрическая обечайка, 7 – нижний поглотитель, 8 – нижний фланец капсулы, 9 – электронагреватель

Рисунок 3. Экспериментальное устройство

Капсула представляет собой герметичную конструкцию, состоящую из цилиндрической обечайки (поз. 6) с нижним (поз. 8) и верхним фланцем (поз. 1), чехла охлаждения (поз. 2). Элементы капсулы выполнены из нержавеющей стали. В зазоре между обечайкой (поз. 6) и чехлом охлаждения (поз. 2) организован тракт принудительного газового охлаждения капсулы. В верхней и донной частях капсулы предусмотрены входной и выходной патрубки для подачи и отвода охлаждающего газа. В качестве охлаждающего газа используется азот.

В верхней и нижней частях чехла охлаждения, на наружной поверхности установлены утолщения (поз. 3,7), выполняющие роль дополнительных поглотителей и обеспечивающие высотное распределение нейтронного потока в устройстве в ИГР близкое к реактору MYRRHA (рисунок 4).

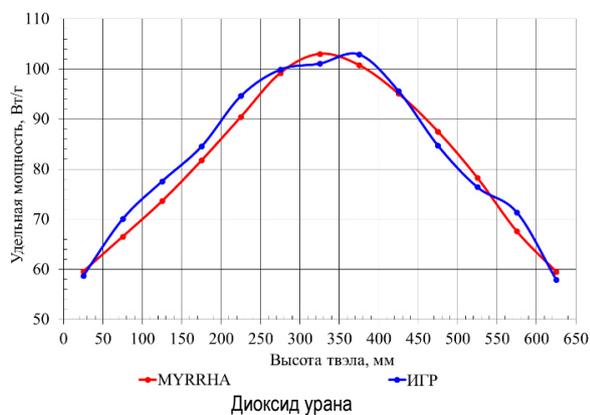
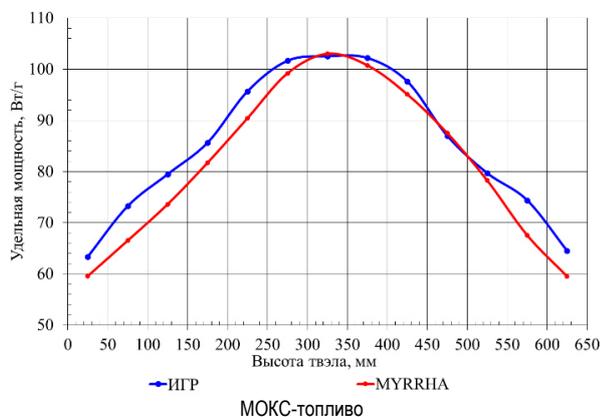
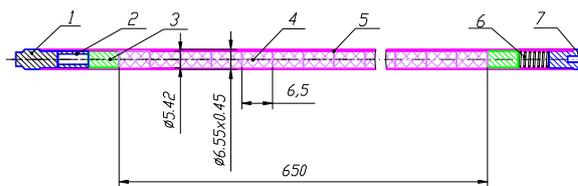


Рисунок 4. Высотный профиль энерговыделения в испытываемом твэле

Твэл (рисунок 5) состоит из цилиндрических топливных таблеток (поз. 4) диаметром 5,42 мм и высотой 6,5 мм, установленных в оболочке (поз. 5) из нержавеющей стали, в которой также установлены стальная проставка (поз. 2), керамические изоляторы (поз. 3) и пружина (поз. 6). На торцах твэла установлены нижняя и верхняя заглушки (поз. 1, 7). В качестве материала топливных таблеток применяется диоксид урана или смешанное оксидное топливо (оксид урана и оксид плутония).



1 – нижняя заглушка, 2 – проставка, 3 – изоляторы, 4 – топливные таблетки, 5 – оболочка, 6 – пружина, 7 – верхняя заглушка

Рисунок 5. Схема модельного твэла

На рисунке 6 представлено расчетное распределение энерговыделения в слоях по радиусу твэла в условиях испытания в ИГР с тепловым спектром нейтронов. Нумерация слоев начинается от оси твэла.

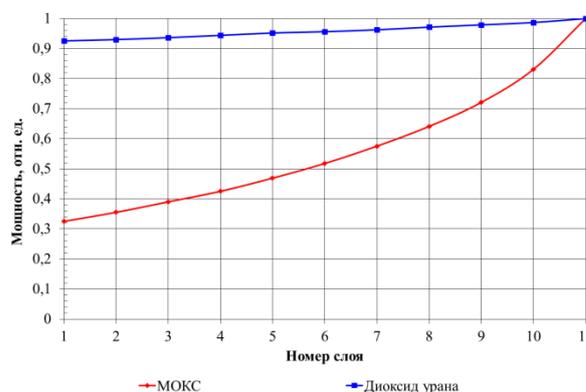


Рисунок 6. Радиальное распределение энерговыделения в испытываемом твэле

Спектр нейтронов в ИГР является преимущественно тепловым, поэтому радиальное энерговыделение в испытываемом твэле при использовании МОКС-топлива будет существенно отличаться от равномерного распределения, характерного для реакторов на быстрых нейтронах.

При подготовке эксперимента капсула разогревается до 400 К встроенными электронагревателями (поз. 9, рисунок 3), затем ИГР выводится на стационарный уровень мощности. Длительность активной фазы эксперимента поддерживается до начала фрагментации топлива. Возможным продолжением эксперимента является реализация вспышки мощности в твэле до уровня, при котором около 50% топливных таблеток будет расплавлено.

#### ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Расчет теплогидравлических характеристик экспериментального устройства в процессе экспериментов в ИГР выполнялся с использованием программного пакета ANSYS [5]. Основываясь на условиях осевой симметрии устройства, для расчетного моделирования был выбран сегмент 1/12 части устройства, включающей в себя модельный твэл, размещенный в объеме эвтектического сплава, корпус капсулы, тракт охлаждения и чехол охлаждения. То-

пливо в твэле было разбито на 143 равных объема (13 элементов по высоте и 11 элементов радиально) (рисунок 7). На верхней и нижней поверхности модели устанавливалось отсутствие теплообмена с внешней средой. Расчетная сетка конечных объемов построена с использованием программного пакета GAMBIT [6]. Общее число четырехугольных призматических элементов в пространственной сетке составляет 285150 (рисунок 7).

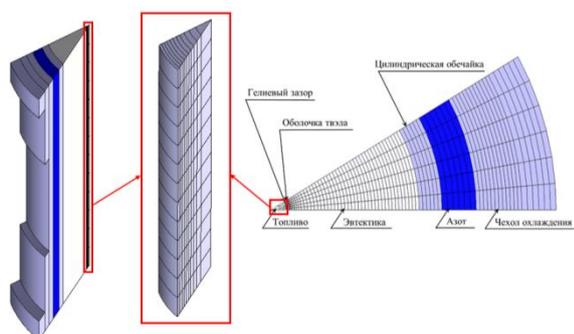


Рисунок 7. Сетка расчетной модели устройства

В расчетах учитывалось конвективное движение эвтектического сплава, возникающее в результате возникновения градиента температуры в объеме эвтектики при ее разогреве и влияющее на процесс отвода тепла от твэла. Учет конвективного движения эвтектики в программе осуществлялся посредством решения системы уравнений Навье – Стокса с учетом уравнения неразрывности и действия силы тяжести. Система этих уравнений описывает наиболее общий случай ламинарного движения жидкой среды. Для учета лучистого теплообмена между топливным сердечником и оболочкой твэла был применен метод эффективной теплопроводности [7], суть которого заключается во внесении поправки, учитывающей вклад лучистого теплообмена в общий теплообмен, в коэффициент теплопроводности гелия, заполняющего зазор. На внешней поверхности капсулы задавались условия конвективного теплообмена с окружающей средой с температурой 300 К при коэффициенте теплоотдачи 5 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Энерговыведение в топливных таблетках твэла задавалось в соответствии с результатами расчета нейтронно-физических параметров устройства. Начальная температура всех конструктивных элементов принималась равной 400 К, время реализации диаграммы мощности реактора – 100 с. Свойства МОКС-топлива в композиции (U<sub>0,7</sub>Pu<sub>0,3</sub>)O<sub>2</sub> в зависимости от температуры были определены с помощью выражений, приведенных в [8]. Свойства диоксида урана и остальных материалов, использованные при проведении расчетов, были приняты из [9-11].

Расчеты выполнялись для двух случаев распределения энерговыведения в твэлах. В первом случае радиальное энерговыведение принималось равномерным и учитывалось лишь высотное распределение энерговыведения (такая ситуация наиболее бли-

зка к условиям работы твэла в реакторе MYRRHA). Во втором случае рассматривалось фактическое распределение энерговыведения в условиях испытаний в ИГР, учитывающее как высотную, так и радиальную неравномерность, характерную для испытываемого твэла (рисунок 8). Подъем мощности твэла при выходе на стационарный режим смоделирован скачком с нулевого значения до номинального.

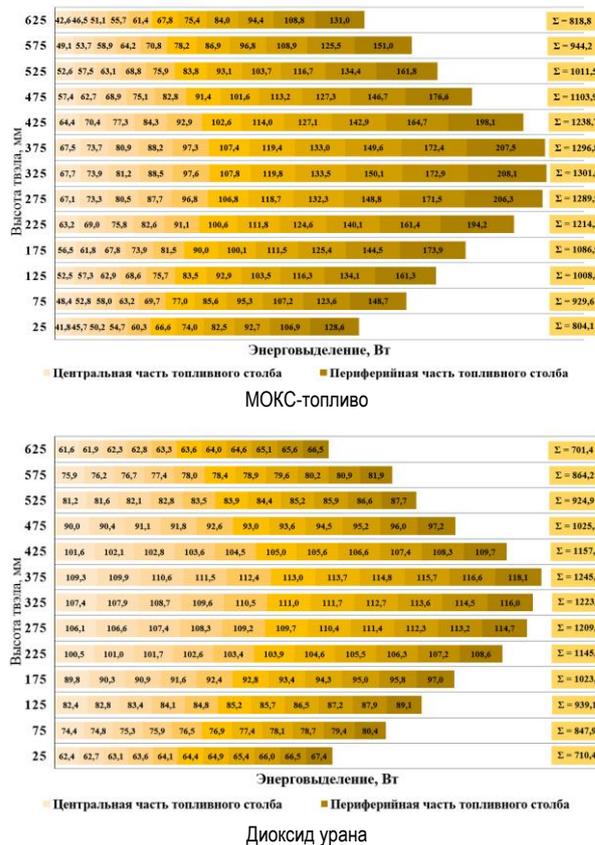
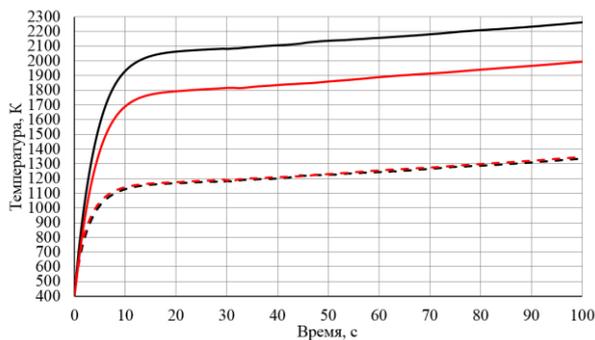


Рисунок 8. Распределение энерговыведения в объеме твэла

На рисунке 9 представлен график изменения максимальной температуры топлива, зафиксированной на высоте 390 мм от нижнего торца топливного столба, в течение 100 с от момента подъема мощности.

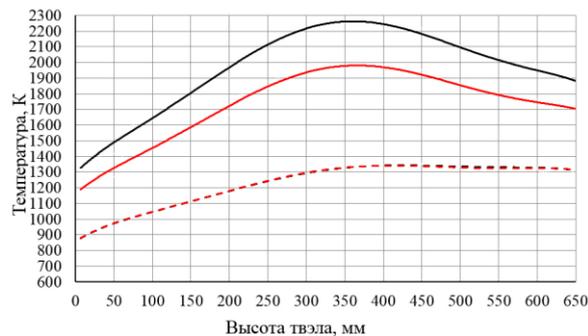
В расчетах с равномерным радиальным распределением энерговыведения на 15 с от начала эксперимента температура в центре топлива составит ~2050 К, что соответствует максимальной рабочей температуре реактора MYRRHA в номинальном режиме. При неравномерном радиальном распределении энерговыведения на 15 секунде от начала эксперимента температура в центре таблетки составит ~1770 К. Видно (рисунок 9), что температура в центре топливной таблетки в случае неравномерного распределения радиального энерговыведения существенно ниже, чем при равномерном. При этом температура на периферии топливной таблетки практически одинакова в обоих рассматриваемых случаях.

**РАСЧЕТ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИСПЫТАНИЙ ТОПЛИВА  
БЫСТРОГО РЕАКТОРА СО СВИНЦОВО-ВИСМУТОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ**



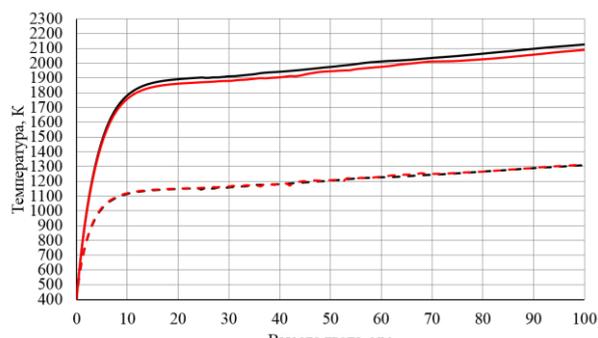
— Центр топливной таблетки - равномерное радиальное распределение энерговыделения  
 - - Периферия топливной таблетки - равномерное радиальное распределение энерговыделения  
 — Центр топливной таблетки - неравномерное радиальное распределение энерговыделения  
 - - Периферия топливной таблетки - неравномерное радиальное распределение энерговыделения

МОКС-топливо



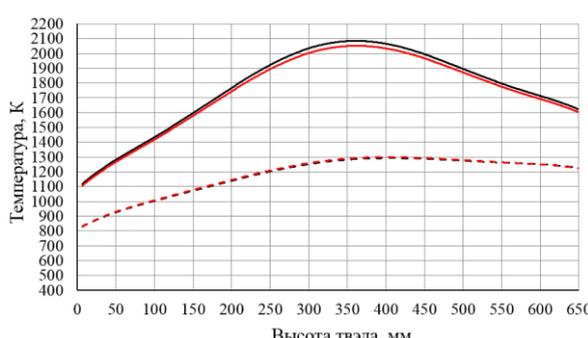
— Центр топливной таблетки - равномерное радиальное распределение энерговыделения  
 - - Периферия топливной таблетки - равномерное радиальное распределение энерговыделения  
 — Центр топливной таблетки - неравномерное радиальное распределение энерговыделения  
 - - Периферия топливной таблетки - неравномерное радиальное распределение энерговыделения

МОКС-топливо



— Центр топливной таблетки - равномерное радиальное распределение энерговыделения  
 - - Периферия топливной таблетки - равномерное радиальное распределение энерговыделения  
 — Центр топливной таблетки - неравномерное радиальное распределение энерговыделения  
 - - Периферия топливной таблетки - неравномерное радиальное распределение энерговыделения

Диоксид урана



— Центр топливной таблетки - равномерное радиальное распределение энерговыделения  
 - - Периферия топливной таблетки - равномерное радиальное распределение энерговыделения  
 — Центр топливной таблетки - неравномерное радиальное распределение энерговыделения  
 - - Периферия топливной таблетки - неравномерное радиальное распределение энерговыделения

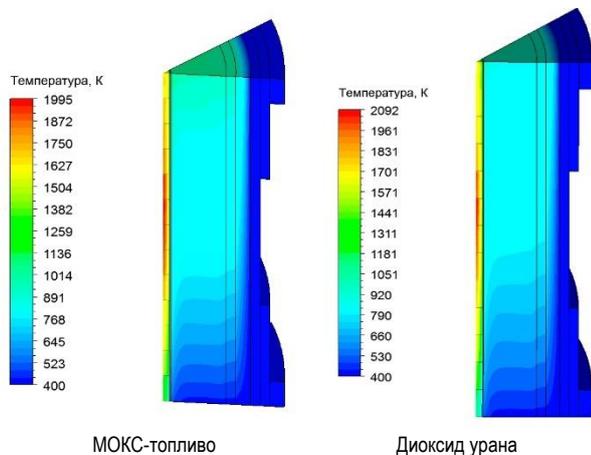
Диоксид урана

Рисунок 9. Изменение температуры топлива в сечении 390 мм от нижнего торца твэла

Рисунок 10. Распределение температуры по высоте твэла на 100 с эксперимента

Установившийся режим разогрева топлива в эксперименте в ИГР достигается приблизительно к 15 секунде эксперимента, после чего разогрев продолжается со скоростью около 2,5 К/с. На рисунке 10 представлен график распределения температуры топливных таблеток по высоте модельного твэла на 100 секунде эксперимента.

Температурное поле в капсуле устройства на 100 секунде эксперимента представлено на рисунке 11.



МОКС-топливо

Диоксид урана

Рисунок 11. Распределение температуры в материалах и теплоносителя капсулы на 100 с эксперимента

Температурное поле эвтектики в разные моменты времени показано на рисунке 12.

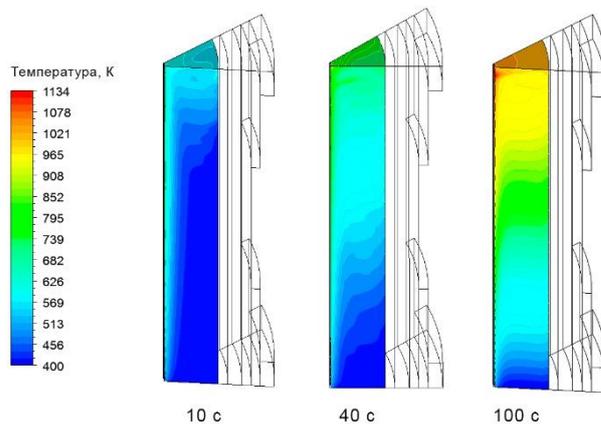


Рисунок 12. Распределение температуры в эвтектике устройства

Поле скоростей, возникающее вследствие конвективного движения эвтектического сплава при его нагреве, представлено на рисунке 13.

Максимальная температура в эвтектическом сплаве на 100 секунде эксперимента достигает значения, равного 1134 К. Поле скоростей в эвтектическом сплаве показывает наличие конвективного дви-

жения сплава, возникающее вследствие уменьшения плотности эвтектики с ростом температуры. Передвижение горячих слоев вверх происходит со средней скоростью 0,26 м/с.

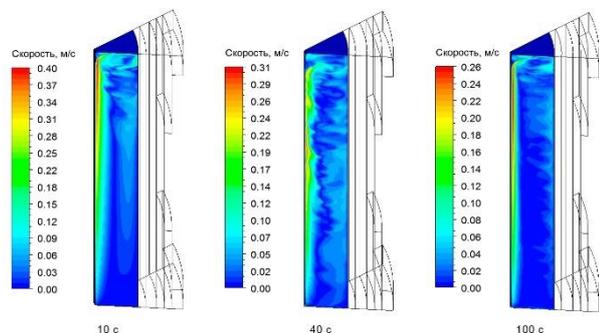


Рисунок 13. Поле скоростей в эвтектическом сплаве устройства

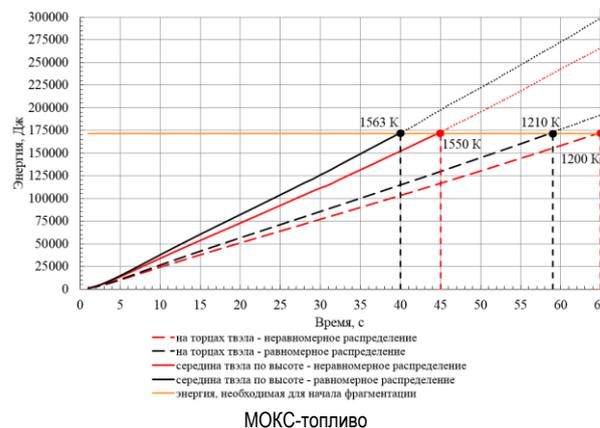
При существующей толщине слоя эвтектики обеспечивается достаточно эффективный теплоотвод от твэла, при этом температура внутренней обечайки в эксперименте не превышает 1010 К, т.е. в эксперименте будет обеспечена целостность стальных конструкций.

#### ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ НАЧАЛА ФРАГМЕНТАЦИИ ТАБЛЕТКИ И АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОДОЛЖЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

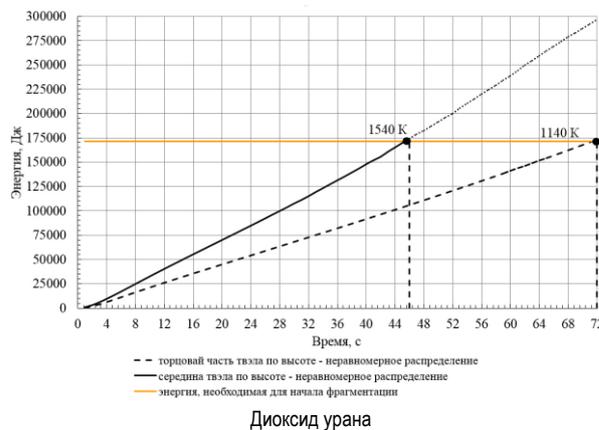
Оценка времени, необходимого для фрагментации таблеток для случаев равномерного и неравномерного распределения радиального энерговыделения, была выполнена на основании анализа данных проведенных ранее экспериментов [12] и допущения, что процесс фрагментации зависит только от количества энергии, поглощенной топливом в результате его облучения. На рисунке 14 представлены графики зависимости энергии, вложенной в топливо, от времени облучения, полученные на основании решения уравнения теплового баланса для экспериментального устройства, с учетом перетоков теплоты от топливных таблеток в окружающие материалы.

Таким образом, предполагается, что в случае равномерного радиального распределения энерговыделения процесс фрагментации топливных таблеток из МОКС-топлива в самой энергонапряженной таблетке твэла начинается на сороковой секунде эксперимента, в случае фактического распределения – на сорок пятой секунде эксперимента. Процесс фрагментации топливных таблеток из диоксида урана в самой энергонапряженной таблетке твэла начинается на сорок пятой секунде эксперимента.

В качестве возможного продолжения эксперимента с фрагментацией топливных таблеток рассматривается случай быстрого ввода энергии, достаточной для расплавления около 50% топлива.



МОКС-топливо



Диоксид урана

Рисунок 14. Графики зависимости энергии от времени облучения в ИГР

В случае фактического распределения энерговыделения в топливе процесс фрагментации всех таблеток топливного столба из МОКС-топлива закончится к шестьдесят пятой секунде от начала эксперимента, а в диоксиде урана к семьдесят второй секунде эксперимента. С учетом этого, на основании решения уравнения теплового баланса была проведена оценка теплового состояния топлива при возможном продолжении эксперимента. Определено, что количество энергии, достаточное для разогрева топлива с номинальной температуры до температуры плавления и расплавления около 50% топлива, составляет  $\sim 160 \div 165$  кДж. На рисунке 15 представлено изменение температуры топлива в сечении 390 мм от нижнего торца твэла во время такого эксперимента.

Температура плавления МОКС-топлива составляет  $\sim 3023$  К, а диоксида урана –  $\sim 2920$  К [13]. При реализации вспышки мощности в твэле до уровня, равного 890 кВт и полушириной вспышки 0,144 секунды температура в центральной части топливного столба достигает температуры плавления. На рисунке 16 представлено максимальное температурное поле топливного столба во время реализации вспышки.

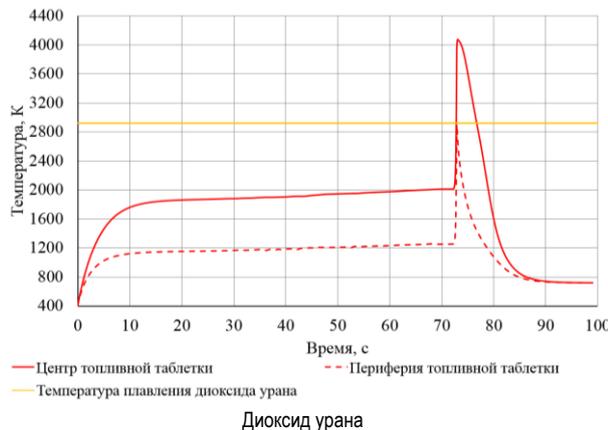
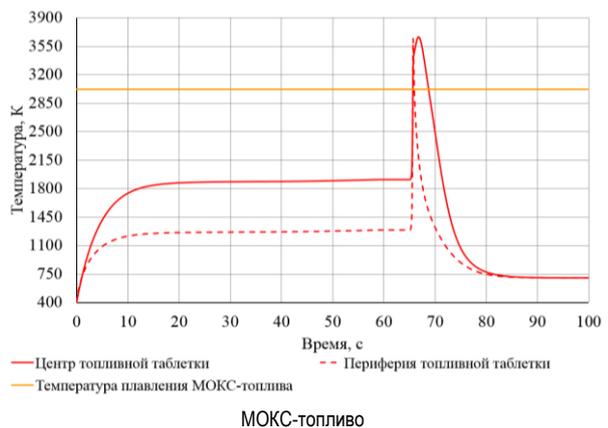


Рисунок 15. Изменение температуры МОКС-топлива и диоксида урана в сечении 390 мм от нижнего торца твэла в эксперименте с частичным расплавлением фрагментированного топлива

Максимальная температура эвтектики составляет 1315 К, что не превышает температуру ее кипения (1943 К), а максимальная температура чехла равна 1030 К. При таких параметрах конструкция устройства обеспечивает безопасные условия для проведения эксперимента.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен комплекс расчетов по определению теплогидравлических параметров устройства в экспериментах. Показана возможность обеспечения требуемого радиального градиента температуры в топливных таблетках из диоксида урана в экспериментах по исследованию их фрагментации. При использовании МОКС-топлива наблюдается меньший радиальный температурный градиент, что связано с неравномерным радиальным энерговыделением в таблетке из МОКС-топлива.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Витюк, В.А. Реактор MYRRHA / Витюк В.А. // Человек. Энергия. Атом. Научно-публицистический журнал. -2015. - №2 (24).
2. Bellony, F. Requirement for the experiments foreseen in the IGR reactor. / F. Bellony // SCK•CEN. REP001. MAXIMA – Grant Agreement. - 2015. - №323312.
3. Ait Abderrahim, H. Fuel design for the experimental ADS MYRRHA. / H. Ait Abderrahim, V. Sobolev, E. Malambu // Technical Meeting on use of LEU in ADS. - October 10-12, 2005. - IAEA, Vienna, Austria.

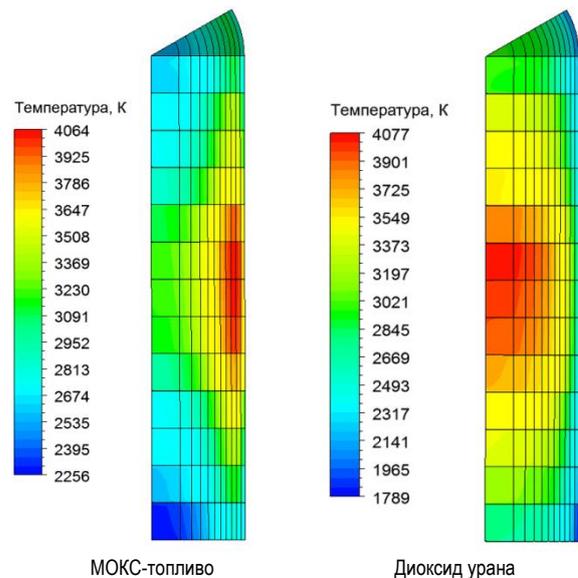


Рисунок 16. Максимальное температурное поле топливного столба во время реализации вспяски

На основании результатов проведенных ранее экспериментов выполнена оценка ожидаемого времени фрагментации топливных таблеток при подержании заданного уровня энерговыделения в твэле.

Исследована возможность проведения эксперимента с набросом мощности в твэле с фрагментированными таблетками. Показана принципиальная возможность реализации диаграммы мощности ИГР, обеспечивающей требуемый характер изменения энерговыделения в твэле в эксперименте с достижением расплавления около 50 % топливных таблеток. Выполнена оценка теплового состояния внутриреакторного устройства в эксперименте, показано, что при реализации заданной последовательности событий сохранится целостность стальных конструкций и будет обеспечен достаточный запас до температуры кипения эвтектического сплава. Таким образом, в результате выполненного расчетного анализа подтверждена возможность проведения экспериментов с твэлами реактора MYRRHA по исследованию фрагментации топливных таблеток и по изучению поведения фрагментированного топлива в условиях резкого роста мощности.

4. Castelliti, D. «SEARCH-MAXSIMA Technical Review Meeting – Task 2.2 status» / D. Castelliti et al. // SEARCH-MAXSIMA Technical Review Meeting. – 22 April 2015. - SCK·CEN.
5. ANSYS, Inc. Products Release 16.0, 2014.
6. GAMBIT 2.4.6, Fluent inc, 2008.
7. Лобасова, М.С. Электронный учебно-методический комплекс по дисциплине «Тепломассообмен» / М.С. Лобасова, К.А. Финников и др. // Сибирский федеральный университет. - 2009. - 201-237 с.
8. Popov, S.G. Thermophysical properties of MOX and UO<sub>2</sub> fuels including the effects of irradiation / S.G. Popov, V.K. Ivanov, J.J. Carbajo, G.L. Yoder // Fissile Materials Disposition Program. - 2000.
9. Bobkov, V.P. Thermophysical properties of materials for nuclear engineering: a tutorial and collection of data. / V.P. Bobkov, L.R. Fokin, E.E. Petrov // IAEA. – 2008. - Vienna.
10. Чиркин, В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / В.С. Чиркин // Атомиздат. – 1968. –М., – 121-128, 291-294, 237-239 с.
11. Сталь марки 12X18H10T // Центральный металлический портал РФ URL: [http://metallicheckiy-portal.ru/marki\\_metallov/stk/12X18H10T](http://metallicheckiy-portal.ru/marki_metallov/stk/12X18H10T).
12. U.S. Nuclear Regulatory Condition: “Data Base on the Behavior of High Burnup Fuel Rods with Zr-1%Nb Cladding and UO<sub>2</sub> Fuel (VVER Type) under Reactivity Accident Conditions”, NUREG-IA-0156 Vol. 2, IPSN-99/08.
13. Maschek, W. et al. Safety Aspects of Oxide Fuels for Transmutation and Utilization in Accelerator Driven Systems / W. Maschek et al. // Journal of Nuclear Materials. – 2003. - Vol. 320, No. 3, PP. 147–155.

### **ҚОРҒАСЫН-ВИСМУТТЫ ЖЫЛУТАСЫМАЛДАҒЫШЫ БАР ЖЫЛДАМ РЕАКТОРЫНЫҢ ОТЫНДАРЫН СЫНАУДЫҢ ЖЫЛУГИДРАВЛИКАЛЫҚ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ЕСЕБІ**

**Г.А. Витюк, В.М. Котов, В.А. Витюк, О.М. Жанболатов**

*ҚР ҰАО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан*

Мақала қорғасын-висмутты жылутасымалдағышы бар жылдам реакторының отындық элементтерін зерттеу импульстік графиттік реакторында сынаудың есептік негізі мәселесіне арналған. Жоспарланған тәжірибелер отын таблеткаларын фрагменттеуді зерттеуге бағытталған. Таблеткалардың материалы ретінде екі нұсқа қарастырылуда: аралас уран-плутоний оксидті отын (МОКС) және уран диоксиді. Сынақтар талап етілетін зерттелуші твэлдердің нейтронды-физикалық сипаттарын қамтамасыз ететін жетілдірілген реакторішілік тәжірибелік құрылғының құрамында орындалады. Жұмыста тәжірибелердегі құрылғының жылуи гидравликалық сипаттарының есептемесінің нәтижесі көрсетілді, сынақ үрдісінде твэлдердің берілген жылу параметрлерінің жетістіктерінің мүмкіндіктері көрсетілді. Твэлдің стационарлық қуаты кезіндегі отындық таблеткалары фрагментінің жетістігі үшін қажетті бағасы орындалды, отындағы қуаттың тұтануын жүзеге асыру кезіндегі отындық таблеткалардың жеке балқуына дейін тәжірибені жалғастыру мүмкіндігі қарастырылды.

### **COMPUTATION OF THERMOHYDRAULIC TESTING PARAMETERS FOR THE FUEL OF FAST REACTOR WITH LEAD-BISMUTH COOLANT**

**G.A. Vityuk, V.M. Kotov, V.A. Vityuk, O.M. Zhanbolatov**

*Institute of Atomic Energy Branch of the RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

The paper devoted to computational validation of potential experiments expected to perform in impulse research graphite reactor using fuel elements of fast reactor with lead-bismuth coolant. Planned experiments are aimed at studying the process of fuel pellets fragmentation. Mixed uranium-plutonium oxide fuel (MOX fuel) and uranium dioxide are considered as candidates for fuel pellets. Experiments are carried out in the developed in-pile experimental device which provides required neutron-physical characteristics of the fuel rods. The paper presents computation data of the device’s thermohydraulic characteristics in the experiments and demonstrates the possibility to reach preset thermal parameters of the fuel rod in the course of the experiment. The time needed for the pellet fragmentation is calculated under stationary power of the fuel rod; possible ways are considered to continue experiment as long as fuel pellets melt down partially while power flash in the fuel.

УДК 621.039.586

## РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ ИСПЫТАНИЙ ТВС ПЕРСПЕКТИВНОГО РЕАКТОРА

Жагипарова Л.К., Пахниц А.В.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В статье представлен анализ безопасного проведения испытаний экспериментального устройства (ЭУ). Представлены результаты расчетов предварительного разогрева ЭУ, проанализирована последовательность событий исследовательского пуска с плавлением топлива и перемещением расплава по сливной трубе в нижнюю ловушку, заполненную натрием. Показано, что в случае развития аварийной ситуации сохраняется целостность конструкции чехла ТВС и корпусов ампулы ЭУ.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования процессов, сопровождающих тяжелые аварии энергетических реакторов с плавлением активной зоны, вследствие которых возможно возникновение повторной критичности, вызваны необходимостью создания предельно безопасного реактора на быстрых нейтронах или разработкой методов, препятствующих или исключающих последствия таких аварий.

Одним из основных ожидаемых результатов исследований является экспериментальное подтверждение возможности создания активной зоны с использованием в конструкции ТВС внутренних труб, обеспечивающих направленное (контролируемое) перемещение расплавленного топлива.

Внутриреакторный эксперимент ID-5 предназначен для исследования масштабов разрушения и параметров перемещения расплава материалов активной зоны через направляющую трубу стержня регулирования, снабженную устройством задания расхода натрия и его влияния на параметры течения расплавленных материалов. Основной решаемой задачей при выборе требуемой диаграммы мощности реактора является определение необходимой величины энthalпии достаточной для получения расплава топлива и стали, последующего разрушения двойных стенок внутренней трубы, моделирующей стенку чехла ТВС и направляющей трубы стержня регулирования, заполненных натрием, разрушения расходозадающего устройства потока натрия, установленного внутри трубы и перемещения расплава в нижнюю ловушку.

Целью настоящей работы является обоснование конструкции и условий безопасного проведения реакторных испытаний экспериментального устройства ID-5.

Полученные результаты будут использованы при разработке конструкции активной зоны, защищенной от аварии с повторной критичностью [1].

### 1 ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Конструкция экспериментального устройства ID-5 (ЭУ ID-5) [2] разработана на основании технического задания [3] и обеспечивает достижение поставленных целей эксперимента. Основными элементами

ми конструкции ЭУ ID-5 являются силовой корпус и внутренние элементы. Силовой корпус состоит из ампулы ID-M (АК.21058.00.000ВО). К внутренним элементам ЭУ относятся чехол ТВС и ловушка расплава.

Основным элементом ЭУ ID-5 является чехол ТВС, который предназначен для размещения ТВС внутри ампулы, формирования защитного барьера для предотвращения теплового и прямого контактного воздействия топлива ТВС на внутренний корпус ампулы. В ТВС используется двухрядная компоновка твэлов. Во внутреннем ряду расположено 24 твэла, в наружном – 30. Заданная компоновка обеспечена путем использования верхнего и нижнего дистанционирующих устройств. В составе твэлов применены топливные таблетки типа БН-350 из диоксида урана с обогащением 17 % по  $^{235}\text{U}$  в активной части и содержанием 0,27 % по  $^{235}\text{U}$  – в бланкетной части топливного столба (таблица 1).

Таблица 1. Технические характеристики ТВС

Наименование параметра	Значение
Топливо	диоксид урана $\text{UO}_2$
Содержание $^{235}\text{U}$ в топливе, %	
– в активной части	17
– в бланкетной части	0,27
Плотность, г/см <sup>3</sup>	10,3...10,8
Наружный диаметр топливной таблетки, мм	5,9±0,02
Внутренний диаметр топливной таблетки, мм	1,5±0,1
Длина топливного столба, мм	450
Длина активной части топливного столба наружного ряда, не менее, мм	~435
Длина активной части топливного столба внутреннего ряда, не менее, мм	~385
Длина бланкетной части топливного столба наружного ряда, не более, мм	~15
Длина бланкетной части топливного столба внутреннего ряда, не более, мм	~65
Материал оболочки	12X18Н10Т
Наружный диаметр оболочки, мм	8
Внутренний диаметр оболочки, мм	6
Масса топливных таблеток суммарная, кг	~5,8

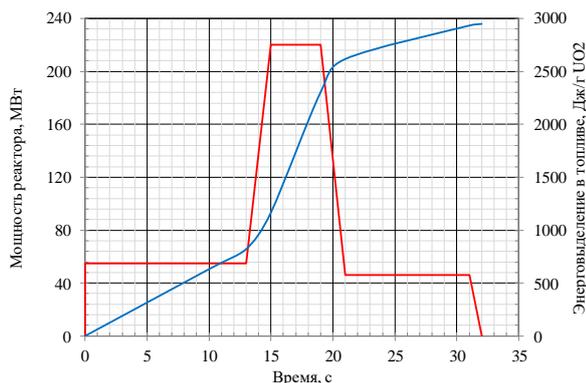


Рисунок 1. Диаграмма энерговыделения в топливе ID-5

Внутри ампулы ID-M устанавливается стальная ловушка, предназначенная для приема расплава, сливающегося из полости чехла ТВС по внутренней трубе, а также для предотвращения теплового и прямого контактного воздействия расплавленного топлива на внутренний корпус ампулы. Защитная функция ловушки расплава обеспечивается за счет высокой интегральной теплоемкости (пассивная защита), в том числе, при потере принудительного охлаждения ампулы экспериментального устройства. Ловушка представляет собой стакан из стали 12X18H10T с наружным диаметром 158 мм и высотой 862 мм.

Мощность устройства ID-5 является основным управляемым параметром в эксперименте. Расчеты подтверждают безопасность проведения пуска с выбранной диаграммой мощности (рисунок 1) [4]. В процессе реализации диаграммы энерговыделения в эксперименте ID-5 предполагается следующая последовательность событий:

- разогрев топливных таблеток за счет внутреннего энерговыделения;
- плавление топлива и оболочек твэлов вследствие внутреннего энерговыделения в топливе;
- образование бассейна расплавленной стали и топлива в полости ТВС;
- плавление внутренней трубы, имеющей двойную стенку и проникновение расплава топлива и стали в полость, заполненную натрием и моделирующей направляющую трубу стержня регулирования, с последующим перемещением расплава в полость трубы;
- контакт расплава с имитатором расходозадающего устройства потока натрия;
- проплавление имитатора расходозадающего устройства и движение расплава по сливной трубе в ловушку, заполненную натрием.

Непосредственно перед пуском ИГР осуществляется разогрев чехла ТВС с топливом и натрием в полостях ТВС, расширительной трубы, сливной трубы и ловушки приема расплава электрическими нагревателями до температуры 673 К, начальное абсолют-

ное давление аргона в полости ТВС при температуре топлива 673 К составляет 0,5 МПа.

После разогрева в устройстве ID-5 проводится пуск ИГР. Пуск проводится по диаграмме изменения мощности в ТВС, обеспечивающей интегральное энерговыделение в топливе 2,8 кДж/г UO<sub>2</sub> (рисунок 1).

Эксперимент заканчивается расхолаживанием, основной целью которого является обеспечение температуры корпуса ампулы и давления внутри полости внутреннего корпуса ампулы в диапазоне разрешенных значений.

## 2 ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ID-5 ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭКСПЕРИМЕНТА

### 2.1 Расчет теплового состояния экспериментального устройства ID-5 при реализации процедуры предварительного разогрева

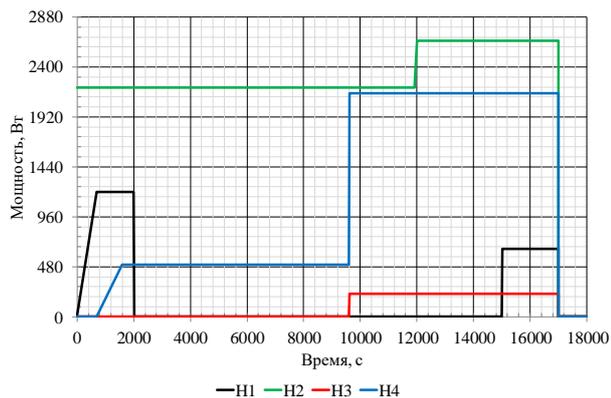
Целью оценки теплового состояния ЭУ ID-5 в предварительном разогреве чехла ТВС [5] являлось определение максимального значения температуры элементов ампулы при разогреве топлива и натрия до 673 К. Расчеты проводились с использованием программного комплекса ANSYS 14.5.7 [6].

Оценка теплового состояния ЭУ ID-5 в процессе предварительного разогрева осуществлялась с использованием двухмерной расчетной модели. В реальной конструкции нагрев будет осуществляться с помощью кабельных нагревателей, размещенных на расширительной трубе, на чехле ТВС, на сливной трубе и ловушке.

Работа электрических нагревателей моделировалась внутренним энерговыделением в дополнительных стальных стенках, при этом толщина стенок соответствовала диаметру кабельных нагревателей.

В расчете задавалась различная по высоте плотность энерговыделения в модели нагревателей, установленных в месте расположения расширительной трубы и ТВС. Участок высотой 112 мм, расположенный в нижней части нагревателя чехла ТВС имеет в 14 раз меньшую плотность энерговыделения по сравнению с верхней частью нагревателя, высотой 642 мм. Участок высотой 90 мм, расположенный в нижней части нагревателя расширительной трубы имеет в 2 раза большую плотность энерговыделения по сравнению с верхней частью нагревателя, высотой 1735 мм. Участок высотой 223 мм, расположенный в нижней части нагревателя расширительной трубы имеет в 10 раз меньшую плотность энерговыделения по сравнению с верхней частью нагревателя, высотой 1735 мм. Такое распределение энерговыделения в нагревателях позволяет уменьшить неравномерность температурного поля по высоте расширительной трубы, чехла ТВС и сливной трубы. Принудительное охлаждение в процессе предварительного разогрева отсутствует.

**РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ ИСПЫТАНИЙ  
ТВС ПЕРСПЕКТИВНОГО РЕАКТОРА**



Н1 – нагреватель расширительной трубы; Н2 – нагреватель чехла ТВС;  
Н3 – нагреватель сливной трубы; Н4 – нагреватель ловушки

*Рисунок 2. Диаграмма изменения мощности электрических нагревателей*

Диаграммы изменения мощности и порядок включения нагревателей, которые моделировались при проведении теплового расчета, подбирались таким образом, чтобы температура элементов чехла ТВС и натрия достигли значения 673 К и процесс плавления натрия протекал сверху вниз. Этим условиям соответствуют диаграммы мощности нагревателей, представленные на рисунке 2.

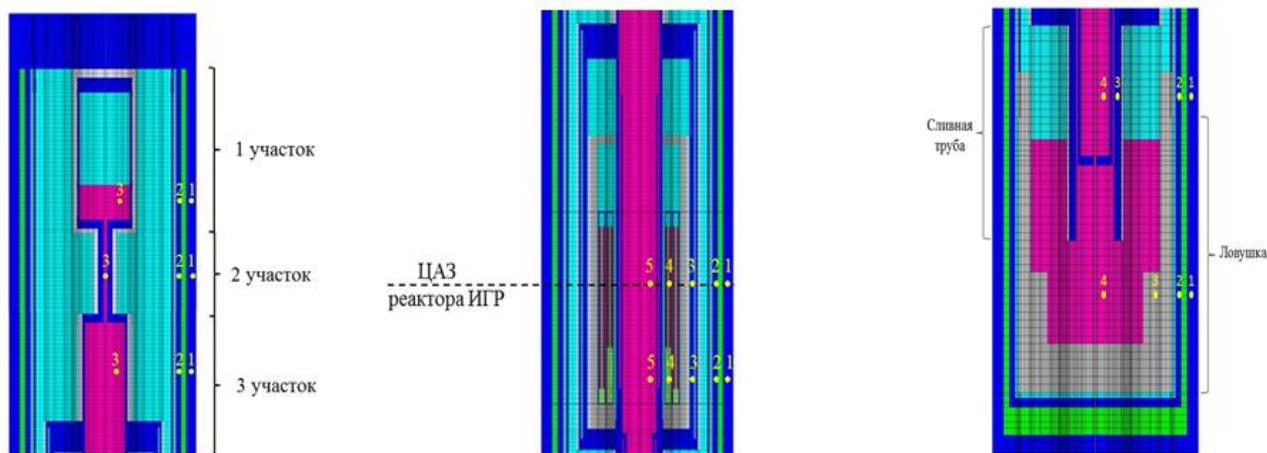
По результатам расчетов, температура расширительной трубы и стенок ампулы определялась в контрольных точках на трех участках показанных на рисунке 3, а. Диаграммы изменения температур в контрольных точках расширительной трубы показаны на рисунке 4, а. Результаты расчета показывают, что в процессе предварительного разогрева температура наружного корпуса ампулы увеличится не бо-

лее чем на 97 К в области расширительной трубы, при этом натрий будет разогрет до температуры ~673 К через 4,5 часа после начала разогрева (рисунок 4, а).

Для сливной трубы и ловушки контрольные точки, в которых определялась температура, показаны на рисунке 3, в. Результаты расчета показывают, что в процессе предварительного разогрева температура наружного корпуса ампулы увеличится не более чем на 111 К в области сливной трубы, при этом натрий будет разогрет до температуры ~673 К через 4,5 часа после начала разогрева (рисунок 4, б). Температура наружного корпуса ампулы увеличится не более чем на 100 К в области ловушки, при этом натрий, находящийся в ловушке, будет разогрет до температуры ~673 К через 4,5 часа после начала разогрева (рисунок 4, б).

Контрольные точки, в которых рассчитывалась температура чехла ТВС и стенок ампулы, расположены на уровне центра активной зоны реактора и на уровне бланкета и показаны на рисунке 3, б. Результаты расчета показывают, что в процессе предварительного разогрева топлива температура наружного корпуса ампулы увеличится не более, чем на 196 К на уровне центра активной зоны (рисунок 5, а) и не более чем на 154 К на уровне бланкета (рисунок 5, б). При этом топливо будет разогрето до температуры приблизительно 673 К через 4,5 ч после начала разогрева (рисунок 5).

В процессе предварительного разогрева плавление натрия будет происходить последовательно от верхних слоев к нижним. Результаты расчета в контрольных точках, расположенных по высоте ЭУ ID-5 в натрии (рисунок 6, а), приведены на рисунке 6, б.



а) расширительная труба

1 – силовой корпус; 2 – внутренний корпус;  
3 – натрий

б) чехол ТВС

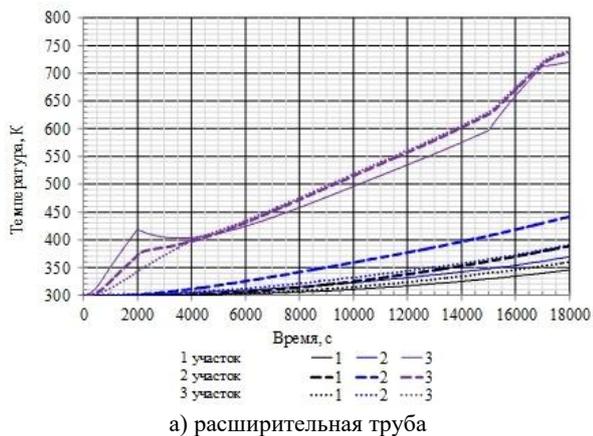
1 – силовой корпус; 2 – внутренний корпус;  
3 – чехол ТВС, 4 – топливо, 5 – натрий

в) сливная труба и ловушка

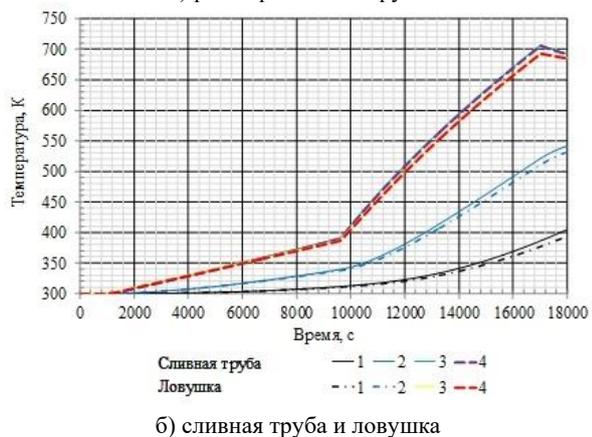
Сливная труба: 1 – силовой корпус; 2 – внутренний корпус; 3 – стенка трубы, 4 – натрий.  
Ловушка: 1 – силовой корпус; 2 – внутренний корпус; 3 – стенка ловушки, 4 – натрий

*Рисунок 3. Расположение контрольных точек по высоте модели ЭУ ID-5*

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ ИСПЫТАНИЙ  
ТВС ПЕРСПЕКТИВНОГО РЕАКТОРА

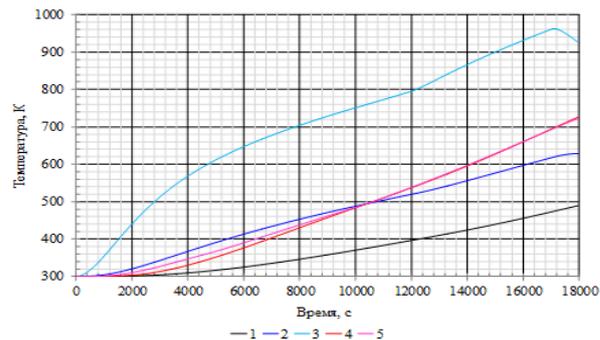


а) расширительная труба

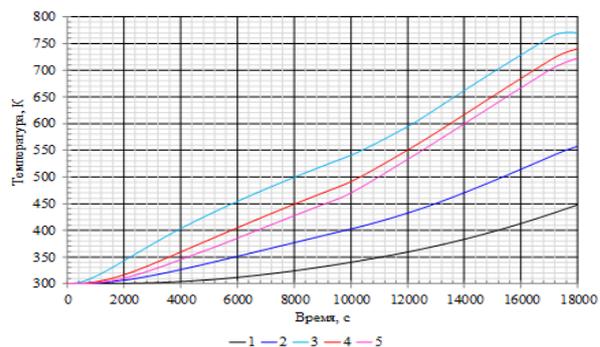


б) сливная труба и ловушка

Рисунок 4. Изменения температур в контрольных точках расширительной трубы, сливной трубы и ловушки в процессе предварительного разогрева

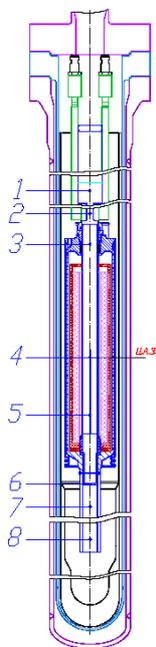


а) диаграмма изменения температуры в контрольных точках на уровне ЦАЗ

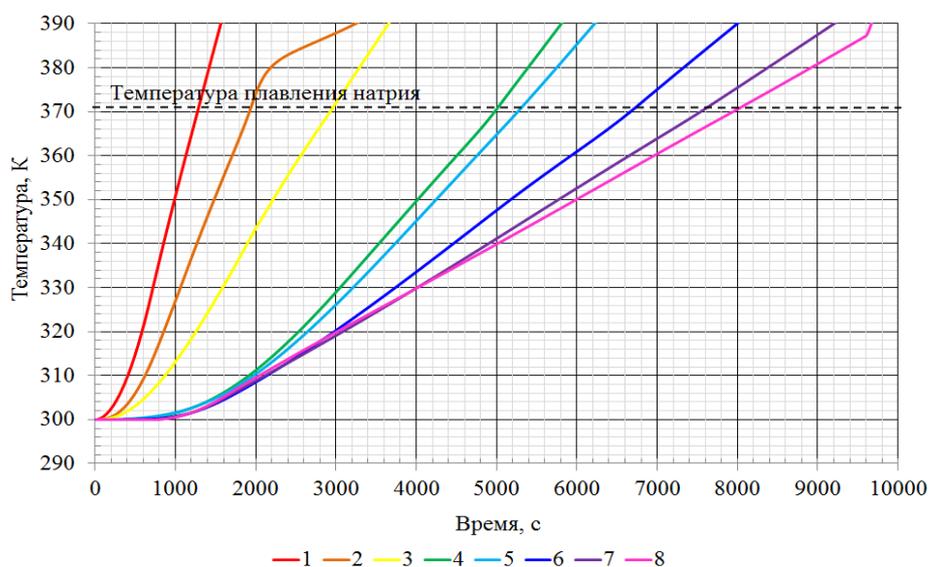


б) диаграмма изменения температуры в контрольных точках на уровне бланкета

Рисунок 5. Изменение температуры в контрольных точках чехла ТВС в процессе предварительного разогрева



а) расположение контрольных точек



б) диаграмма изменения температуры в контрольных точках

Рисунок 6. Изменение температуры на различных уровнях по высоте ЭУ ID-5

## 2.2 Расчет диаграммы изменения мощности ИГР в эксперименте

Расчет теплового состояния чехла ТВС при реализации диаграммы (рисунок 1) [4] выполнен с использованием четырех расчетных моделей (рисунок 7), характеризующих четыре основных конфигурации элементов чехла ТВС в процессе эксперимента с использованием программного комплекса ANSYS 14.5.7 [6]. При проведении расчета предполагалось, что изменение конфигурации элементов чехла ТВС происходит мгновенно, при этом начальное распределение температуры в элементах чехла ТВС в каждой последующей модели определялось исходя из соответствующего распределения на момент окончания расчета с использованием предыдущей модели. Теплопередача в элементах конструкции осуществляется за счет теплопроводности и лучистого теплообмена. По высоте модель твэла была разбита на 45 частей шагом 10 мм.

Первая расчетная модель (рисунок 7, а), определяющая исходную конфигурацию чехла ТВС, использовалась при расчете теплового состояния от момента начала реализации диаграммы энерговыделения в топливе до момента достижения оболочками твэлов среднemasсовой температуры 1700 К (с 0 по 13 с эксперимента). В расчете начальная температура всех элементов конструкции использована из расчета предварительного разогрева [5].

Вторая модель (рисунок 7, б) описывает состояние чехла ТВС от момента формирования бассейна расплавленной стали до момента достижения среднemasсовой температурой топлива уровня 3100 К (с 13 по 19 с эксперимента).

В третьей модели (рисунок 7, в) представлено состояние чехла ТВС, соответствующее формированию расплава топлива и нержавеющей стали в полости ТВС, при этом в модели принято допущение о

пространственном разделении расплавов без смешивания. Расчет с третьей моделью проводился от момента, соответствующего образованию расплава топлива, до момента достижения среднemasсовой температурой наружной стенки внутренней трубы уровня 1700 К (с 19 по 21 с эксперимента).

Четвертая модель (рисунок 7, г) определяет конфигурацию элементов чехла ТВС после разрушения наружной стенки внутренней трубы. Расчет с четвертой моделью проводился от момента контакта расплава топлива и стали с внутренней стенкой внутренней трубы до момента ее разрушения. Предполагается, что внутренняя стенка внутренней трубы будет расплавлена после того, как начнется процесс кипения натрия в ее полости (с 21 по ~27 с эксперимента).

Объемное распределение энерговыделения в топливе определялось по результатам проведенных нейтронно-физических расчетов [7] и рассчитанного значения отношения энерговыделения топлива ID-5 к энерговыделению в ИГР для различных конфигураций чехла ТВС.

Для конфигурации чехла ТВС с бассейном расплавленного топлива среднее значение отношения энерговыделения топлива ID-5 к энерговыделению в ИГР составило  $0,683 \times 10^{-6}$  1/г.

На рисунке 8 представлен характер изменения температуры топлива и оболочек твэлов в контрольных точках с 0 по 19 с. Предполагается, что с 13 с после начала пуска ИГР оболочки твэлов достигнут температуру плавления стали – 1700 К. Топливо достигнет температуру плавления 3100 К на 19 с после начала пуска ИГР.

На рисунке 9 представлено температурное поле в чехле ТВС в различные моменты реализации диаграммы мощности ИГР.

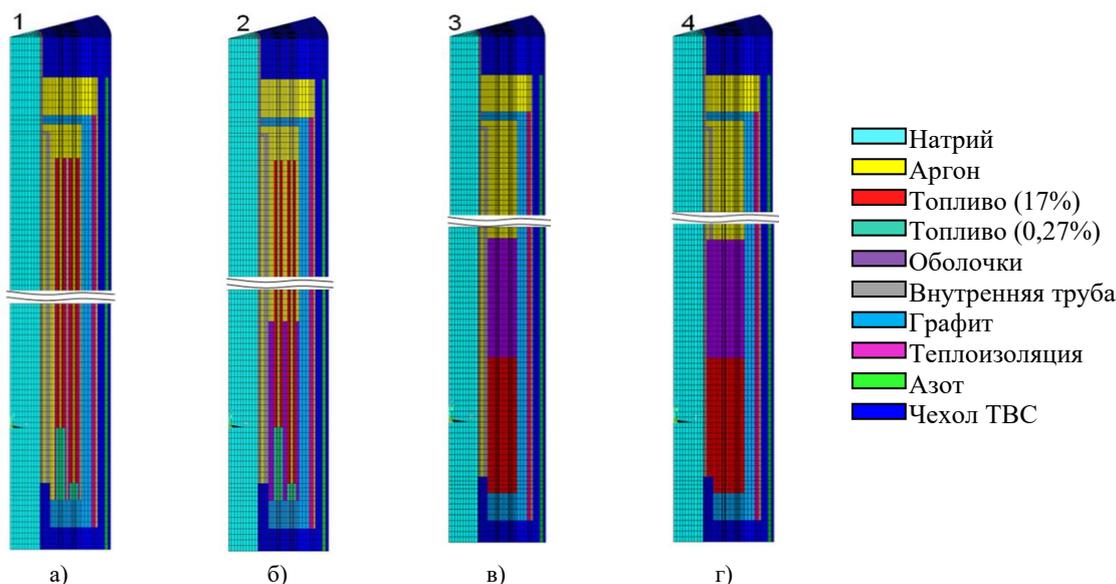


Рисунок 7. Расчетные модели чехла ТВС

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ ИСПЫТАНИЙ  
ТВС ПЕРСПЕКТИВНОГО РЕАКТОРА

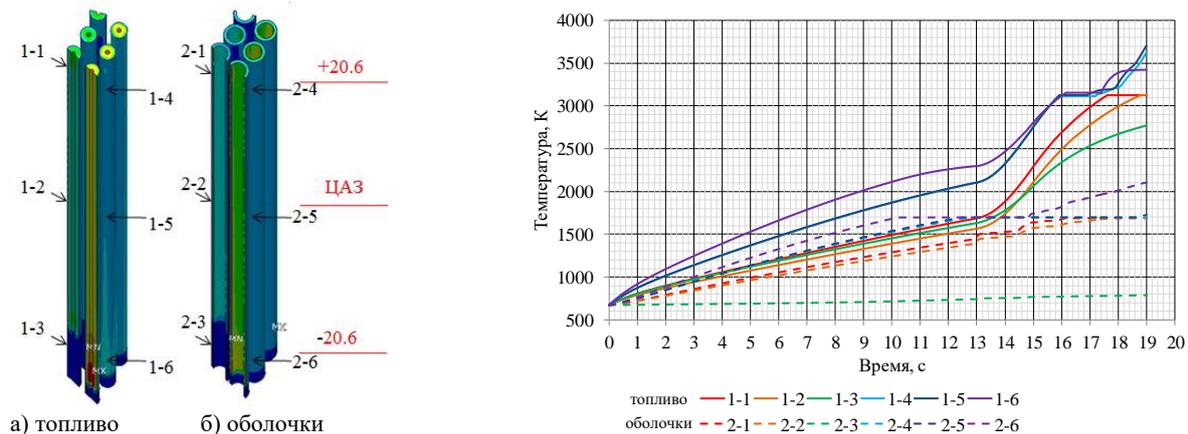


Рисунок 8. Характер изменения температуры топлива и оболочек ТВЭЛ в контрольных точках до момента образования бассейна расплавленного топлива и расплавленной стали

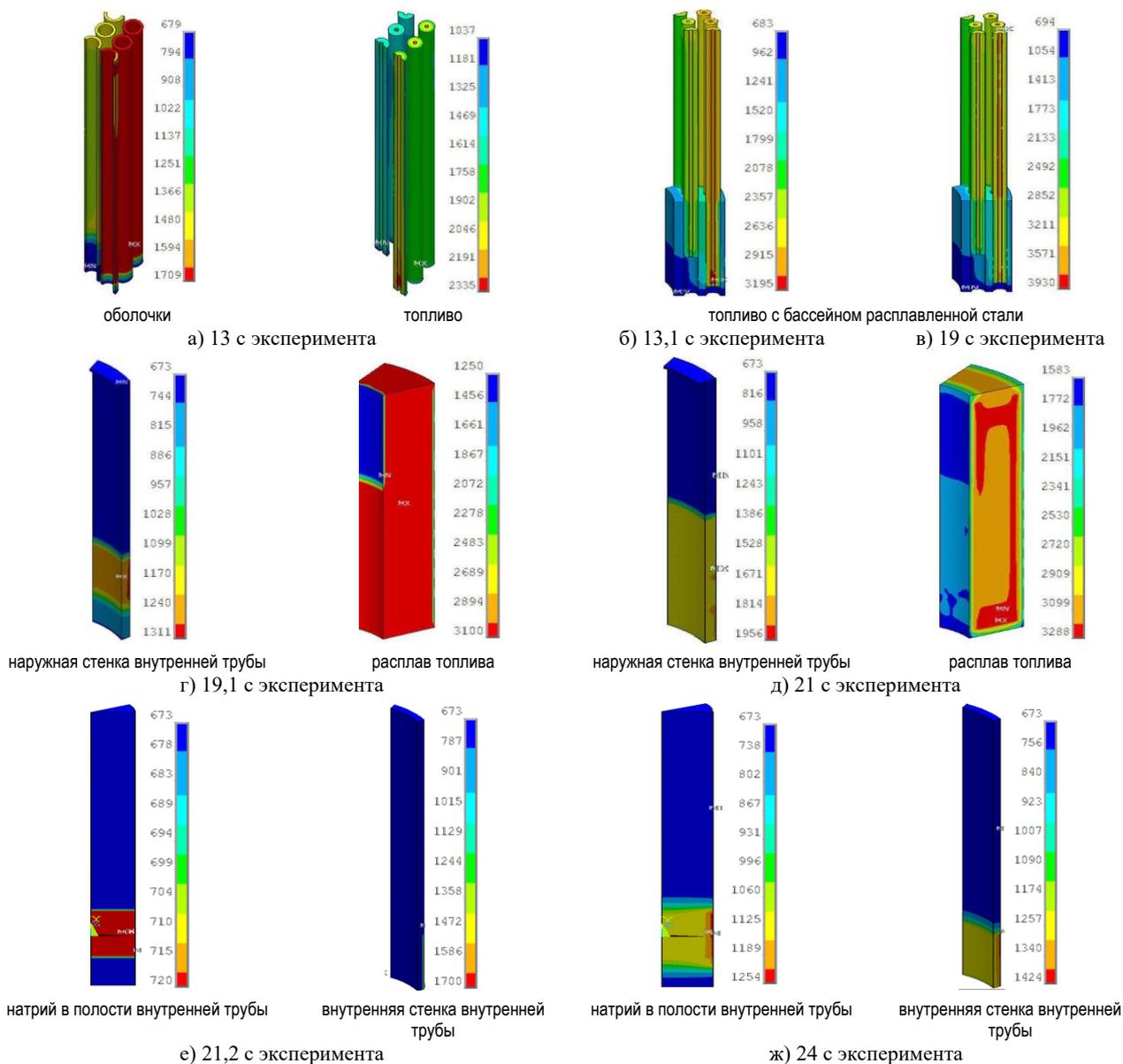


Рисунок 9. Температурное поле в чехле ТВС на различных этапах реализации эксперимента

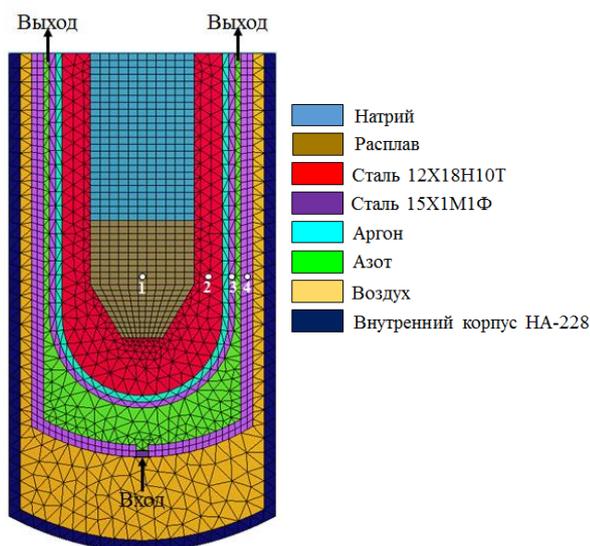
Момент времени 24 с (рисунок 9, ж) соответствует началу кипения натрия в полости внутренней трубы. Предполагается, что с этого момента может начаться плавление внутренней стенки внутренней трубы и расплав перемещается в полость ловушки.

Температура графитовой стенки чехла ТВС на 27-ой секунде эксперимента не превысит 2187 К в области прилегающей к расплаву топлива и 2092 К на внешней стороне стенки. Целостность графитового стакана обеспечивается при температуре до 2500 К.

При условии сохранения целостности графитового стакана и теплоизоляции из графитового войлока во время реализации заданной диаграммы мощности температура стенки чехла ТВС увеличится на 4 К от начальной температуры 673 К. Целостность стального стакана чехла ТВС обеспечивается до 873 К.

### 2.3 Тепловое состояние ампулы экспериментального устройства ID-5 при попадании расплава в ловушку

Расчеты были проведены в программном комплексе ANSYS 14.5.7 [6] с использованием двухмерной расчетной модели ловушки экспериментального устройства ID-5 (рисунок 10) [8].



1 – расплав, 2 – ловушка (сталь 12X18H10T), 3 – внутренний корпус (сталь 15X1M1Ф), 4 – силовой корпус (сталь 15X1M1Ф).

Рисунок 10. Расчетная модель ловушки и расположение контрольных точек

Основной задачей расчета являлась оценка температуры корпусов ампулы рисунок 10, образующих тракт охлаждения ампулы в случае проплавления имитатора расходозадающего устройства потока натрия и перемещения расплава по сливной трубе в аварийную ловушку заполненную натрием. Корпуса изготовлены из стали 15X1M1Ф и согласно ГОСТу 5949-75 [9] сталь эксплуатируется при температурах до 858 К.

Расчетные значения температуры внутреннего и наружного корпусов в нижней части ампулы анализировались для двух вариантов:

1. Штатная ситуация, когда в ловушке присутствует расплав, погруженный в жидкий натрий с охлаждением ампулы азотом;

2. Аварийная ситуация, когда в ловушке присутствует расплав, погруженный в жидкий натрий, а подача азота на охлаждение ампулы снижена до минимума.

При проведении расчета был использован консервативный подход, заключающийся в том, что для расплава стали и топлива была принята температура расплава топлива. Это допущение позволило обеспечить намного более жесткие условия безопасности при условии, что стенки внутреннего и наружного корпусов ампулы не перегрелись.

При проведении расчетов принимались следующие допущения:

- в полости ловушки сформирован бассейн расплава с начальной температурой 3100 К;
- в качестве начального распределения температуры элементов конструкции ID-5 принималось распределение, полученное в результате расчета режима предварительного разогрева [5];
- теплопередача в элементах конструкции осуществлялась за счет теплопроводности;
- на внешней поверхности наружного корпуса, контактирующей с воздухом, задан конвективный теплообмен с коэффициентом теплоотдачи 5 Вт/(м<sup>2</sup> К).
- не происходит изменения пространственной конфигурации расплава и конструктивных элементов;
- в тракте охлаждения ампулы циркулирует азот с температурой на входе 283 К и расходом 200 г/с;
- в случае аварийной ситуации в тракте охлаждения ампулы циркулирует азот с температурой на входе 283 К и расходом 0,1 г/с.

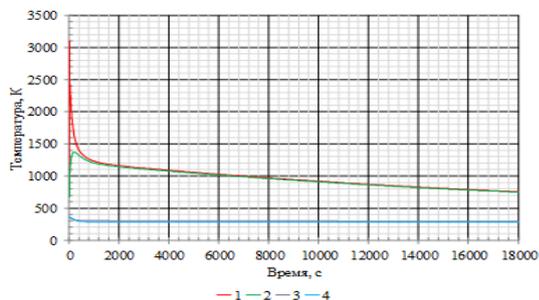
Результаты расчета температур приведены для контрольных точек, показанных на рисунке 11.

В соответствии с результатами расчета тепловое состояние экспериментального устройства в штатной ситуации характеризуется следующими параметрами (рисунок 11, а):

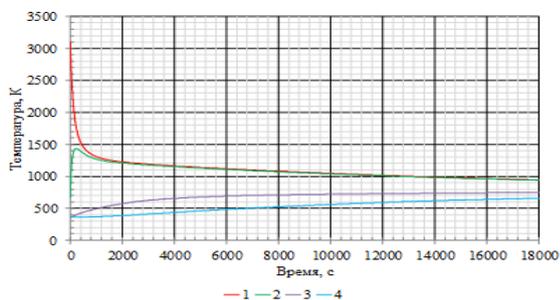
- максимальная температура внутреннего и наружного корпусов ампулы в начальный момент после слива расплава в ловушку достигнет 361 К. Через три часа после слива расплава в ловушку температура внутреннего и наружного корпусов составит 291 К и 284 К соответственно.

Тепловое состояние корпусов экспериментального устройства на уровне ловушки в аварийной ситуации характеризуется следующими параметрами (рисунок 11, б):

- через 3 часа после слива температура внутреннего корпуса ампулы достигнет 723 К;
- максимальная температура внутреннего корпуса ампулы составит 758 К через ~8 часов после слива расплава.



а) при штатной ситуации



б) при аварийной ситуации

Рисунок 11. Распределение температуры в конструктивных элементах экспериментального устройства ID-5 после перемещения расплава в ловушку

## ЛИТЕРАТУРА

1. Исследования процессов, сопровождающих тяжелые аварии энергетических реакторов с плавлением активной зоны: отчет о НИР (заключительный) / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК; рук. А.А. Колодешников, А.Д. Вурим.– Курчатов, 2009.– 77 с.– Гос. инв. № 0209РК00987.
2. Экспериментальное устройство ID5 / Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК / АК.21254.00.000.ВО инв. № к-52194 от 16.02.2015 г.
3. Экспериментальное устройство для исследования параметров течения расплавленных материалов активной зоны по направляющей трубе стержня регулирования: техническое задание на разработку технического проекта.– Инв. № 984 от 25.06.2014.
4. Исследования в обоснование безопасности объектов использования ядерной техники: отчет о НИР (заключительный) / Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК; рук. А.А. Колодешников, А.Д. Вурим.– Курчатов, 2014.– 70 с.– Гос. инв. № 0112РК00798.
5. Тепловое состояние экспериментального устройства ID-5 (ЭУ ID-5) при предварительном разогреве: расчет / Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК.– Курчатов, 25.03.2016.– инв. №11-220-01/452вн.
6. ANSYS release 14.5 Documentation for ANSYS WORKBENCH [Электронный ресурс]: ANSYS Inc. – Электрон. дан. и прогн. – [Б. м.], 2014 г.
7. Bench-Mark model of the IGR reactor. / V.M. Kotov, R.A. Irkimbekov, A.M. Kurpesheva // The collection of theses of 8th International conference «Nuclear and radiation physics», Almaty, 20-23th September, 2011.– P. 37.
8. Тепловое состояние ампулы ID-5 при попадании расплава в ловушку: техническая справка / Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК.– Курчатов, 18.04.2016.– инв. №11-220-01/537вн.
9. ГОСТ 5949-75 Сталь сортовая и калиброванная коррозионно-стойкая, жаростойкая и жаропрочная. ТУ.– М., 1975.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам расчетов по определению теплового состояния экспериментального устройства ID-5 при реализации процедуры предварительного разогрева получено, что начальная температура топлива и натрия будет достигнута через 4,5 часа после начала разогрева. Плавление натрия в первую очередь начинается в расширительной трубе и чехле ТВС, затем в полости сливной трубы и ловушке последовательно от верхних слоев к нижним.

По результатам проведенных нейтронно-физических расчетов было определено отношение энерговыделения в топливе к энерговыделению в реакторе для трех конфигураций состояния топлива ТВС и элементов чехла ТВС.

По результатам расчетов диаграммы мощности реактора в эксперименте будет образован расплав топлива и стали, который затем разрушит двойную стенку внутренней трубы с расходоизающим устройством потока натрия внутри и переместится в полость ловушки. При условии сохранения целостности графитового стакана и теплоизоляции из графитового войлока во время реализации заданной диаграммы мощности сохраняется целостность стальной стенки чехла ТВС.

В результате расчетов теплового состояния ампулы ЭУ ID-5 при попадании расплава в ловушку показано, что рассчитанные тепловые параметры стенок корпусов ампулы не превышают допустимых рабочих значений температур и, следовательно, обеспечивают целостность ее конструкции.

## КЕЛЕШЕКТЕГІ РЕАКТОРДЫҢ ЖБЖ СЫНАУ РЕЖИМДЕРІН ЕСЕПТІК НЕГІЗДЕУІ

Л.К. Жагіпарова, А.В. Пахниц

*ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан*

Мақалада тәжірибелік құрылғының (ТҚ) сынақтарын қауіпсіз жүргізудің талдауы ұсынылған. ТҚ алдын ала қыздыру есептерінің нәтижесі ұсынылды, отынның балқуымен және натриймен тотырылған төменгі қақпандағы балқыманың ағызу құбырының бойымен орын ауыстыруымен зерттеулік іске қосу оқиғасының тізбектілігі қайта талданды. Көрсеткендей, апаттық жағдайдың пайда болуы жағдайында ЖБЖ қабының және ТҚ ампулының корпустарының бүтіндігі сақталады.

## COMPUTATIONAL VALIDATION OF FA TEST MODES OF ADVANCED REACTOR

L.K. Zhagiparova, A.V. Pakhnits

*Institute of Atomic Energy Branch of the RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

The paper presents analysis of safe testing of the experimental device (ED). The calculation data of ED preheating are presented, the sequence of research start-up with fuel melting and movement of the melt throughout the discharge duct into the lower melt trap filled with sodium is analyzed. It is shown that the structural integrity of FA jacket and ED ampule casing will not be failed if accident is progressed.

УДК 621.039.531

## РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ РЕЗОНАНСНОГО САМОЭКРАНИРОВАНИЯ В АКТИВАЦИОННЫХ ИНДИКАТОРАХ ИЗ ЗОЛОТА

Жумадилова У.А., Прозорова И.В.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В статье представлены результаты нейтронно-физических расчетов по вычислению скорости реакции ( $n, \gamma$ ) в активационных индикаторах из золота, зависимости поправочных коэффициентов самоэкранирования от толщины индикатора, подобранные формулы для расчета поправочных коэффициентов для аналитического метода, изменения скорости реакции в зависимости от концентрации изотопов, эффект самоэкранирования. Актуальность работы обусловлена необходимостью оценить факторы резонансного самоэкранирования в активационных индикаторах из золота, используемых при проведении нейтронно-активационного анализа однокомпараторным методом к $0$ -стандартизации. Результаты расчетных исследований используются при проведении нейтронно-активационного анализа конструкционных материалов ядерной техники.

### ВВЕДЕНИЕ

С 2012 года в ИАЭ проводятся исследования по адаптации инструментального нейтронно-активационного анализа (НАА) на реакторах ИВГ.1М и ИГР, включая и такую современную модификацию метода, как к $0$ -Инструментальный НАА (к $0$ -ИНАА).

В сравнении с традиционно применяемым сравнительным НАА метод к $0$ -ИНАА или метод к $0$ -стандартизации, имеет целый ряд преимуществ. Особенно метод предпочтителен, когда интенсивность активирующего излучения (поток нейтронов) в данной серии анализов меняется от одного облучения к другому. Метод к $0$ -стандартизации заслуживает особого внимания при серийном определении большого числа элементов в одной пробе, когда использование эталонов в каждом анализе требует больших затрат труда и времени на различные подготовительные операции и измерение активностей. При использовании метода к $0$ -стандартизации для определения элементного состава образцов отпадает необходимость в многоэлементных стандартах, как это требуется в сравнительном методе. Кроме того, этот метод обеспечивает воспроизводимость результатов анализов и точность на том же уровне, как и сравнительный метод.

В НАА при проведении экспериментов, когда энергетический интервал попадает много резонансов, результат измерения средней скорости реакции активации может быть искажен эффектом самоэкранирования. Физический смысл эффекта самоэкранирования заключается в том, что происходят изменения спектра потока нейтронов, падающих на индикатор, по мере их проникновения в глубину образца. При этом спектр нейтронов оказывается все более и более обедненным нейтронами с резонансными энергиями. В том случае, когда в группу, охватываемую энергетическим разрешением, попадают один или несколько особо сильных резонансов, внешние слои индикатора эффективно экранируют всю остальную массу индикатора от нейтронов соответствующих энергий даже для сравнительно маленьких

толщинах. Вследствие чего получаемые результаты начинают зависеть от толщины индикатора.

Целью данной работы являлось определение поправок на резонансное самоэкранирование активационных индикаторов (АИ) при облучении. В результате проведенных расчетных исследований были определены: зависимость скорости реакции ( $n, \gamma$ ) для АИ из золота от толщины АИ, ядерной концентрации и энергии нейтронов, а также коэффициенты самоэкранирования в материалах АИ.

### 1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Объектом исследования являлись АИ из золота ( $^{197}\text{Au}$ ), используемые при НАА. Основные параметры АИ приведены в таблице 1.

В расчетах АИ имеют форму цилиндра различной высоты диаметром 1 мм. АИ облучается изотропным источником промежуточных нейтронов реакторного спектра.

Таблица 1. Состав и плотность детекторов для НАА

Тип индикатора	Химический состав матрицы образца, % масс.	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Золото	Au, 100 %	19,32

При расчетах коэффициентов самоэкранирования для резонансных АИ вводятся следующие допущения:

- АИ представляет собой тонкую пластину;
- Направление падения нейтронов на поверхность АИ изотропное.

### 2 НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

Нейтронно-физические расчеты были проведены с помощью программы MCNP5[1,2], относящейся к числу универсальных программ для решения задач переноса излучения в произвольной трехмерной геометрии с библиотеками констант ENDF/B-5,6.

Расчетная модель представляет собой систему источник-АИ и представлена на рисунке 1.

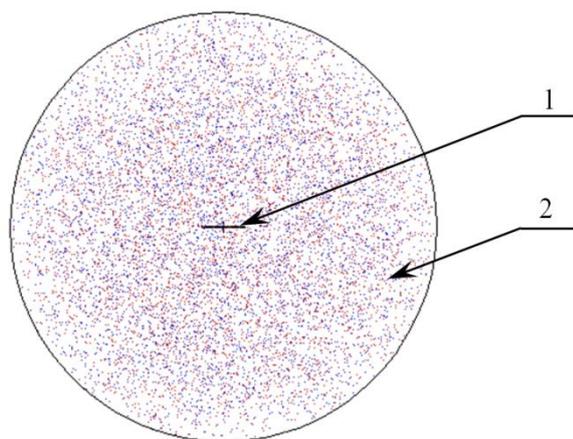


Рисунок 1. Расчетная модель системы источник-АИ  
(1 – АИ, 2 – нейтроны реакторного спектра)

Самопоглощение нейтронов и рассеяние в АИ представляют эффекты, которые определяют фактор резонансного самоэкранирования  $G_{rez}(R)$ .

Фактор резонансного самоэкранирования  $G_{rez}(R)$  в проволоке радиуса  $R$  определяется как отношение скорости реакции в реальном образце к скорости реакции в бесконечно разбавленном образце. Таким образом:

$$G_{rez}(R) = \frac{\int_{E_1}^{E_2} \Phi(E) \sigma_{n\gamma}(E) dE}{\int_{E_1}^{E_2} \Phi_0(E) \sigma_{n\gamma}(E) dE},$$

где  $\Phi_0(E)$  – невозмущенный поток эпитепловых нейтронов на единичный интервал энергии внутри бесконечно разбавленного образца;

$\Phi(E)$  – представляет собой возмущенный поток внутри реального образца;

$\sigma_{n\gamma}(E)$  – сечение реакции, где  $E_1$  и  $E_2$ , соответственно, верхний и нижние пределы энергии резонансов.

Для возмущенного потока нейтронов  $\Phi(E)$  было принято в расчет полное сечение нейтронов, которое учитывает рассеяние нейтронов в образце. Для того чтобы рассчитать невозмущенную скорость реакции задается фиктивная плотность  $\rho_0 \cdot 10^{-6}$  для моделирования бесконечного разведения, при этом  $\rho_0$  представляет собой значение плотности реального образца.

Для заданного радиуса  $R$  энергозависимый фактор резонансного самоэкранирования может быть определен как:

$$G_r(E) = \frac{RR(E, \rho_0)}{RR(E, \rho_0 \cdot 10^{-6})}$$

где  $RR(E, \rho_0)$  и  $RR(E, \rho_0 \cdot 10^{-6})$  – скорости реакций для плотности  $\rho_0$  и  $\rho_0 \cdot 10^{-6}$  соответственно.

В общем случае фактор резонансного самоэкранирования зависит от плотности материала (концентрации), атомной массы, примесей, толщины индикатора и особенно от резонансных сечений.

На первом этапе определялись зависимости  $G_{rez}(R)$  от толщины индикатора.

Расчеты были выполнены двумя методами: с помощью программы MCNP и аналитическим.

Для аналитического метода были подобраны формулы для расчета поправочных коэффициентов:

$$G(E_{res}, t) = \frac{1}{1+(t/a)^b},$$

где  $t$  – толщина индикатора, мм;  
для  $^{197}\text{Au}$   $a=0,012$ ;  $b=0,7$ .

На рисунке 2 приведены результаты расчета зависимости поправочного коэффициента  $G(E_{res}, t)$  от толщины Au-индикатора и данные из литературных источников.

Численные значения скоростей реакций  $R(n, \gamma)$  и вычисленные поправочные коэффициенты для Au-индикатора приведены в таблице 2.

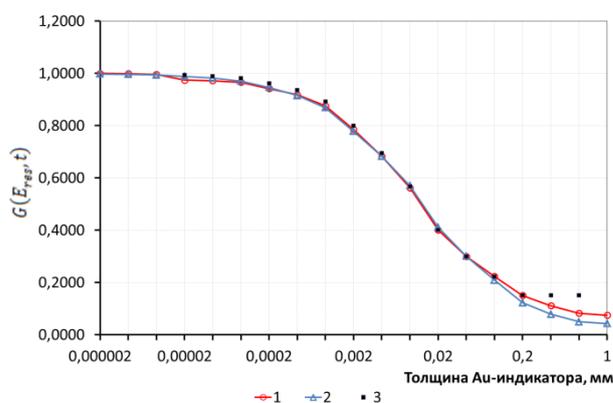


Рисунок 2. Зависимость поправочного коэффициента  $G(E_{res}, t)$  от толщины Au-индикатора (1 – MCNP; 2 – аналитический метод; 3 – литературные данные)

Таблица 2. Результаты расчетов для Au-индикатора

Толщина, мм	R(n, γ)	$G(E_{res}, t)$ MCNP	$G(E_{res}, t)$ аналит. метод	$G(E_{res}, t)$ литерат. [4]
2,0·10 <sup>-6</sup>	0,2594	1,0000	0,9977	
4,0·10 <sup>-6</sup>	0,2592	0,9994	0,9963	
8,0·10 <sup>-6</sup>	0,2585	0,9964	0,9941	
2,0·10 <sup>-5</sup>	0,2528	0,9747	0,9888	0,9936
4,0·10 <sup>-5</sup>	0,2521	0,9720	0,9819	0,9893
8,0·10 <sup>-5</sup>	0,2506	0,9660	0,9709	0,9815
2,0·10 <sup>-4</sup>	0,2443	0,9417	0,9461	0,9621
4,0·10 <sup>-4</sup>	0,2382	0,9182	0,9154	0,9355
8,0·10 <sup>-4</sup>	0,2271	0,8756	0,8694	0,8927
2,0·10 <sup>-3</sup>	0,2038	0,7855	0,7780	0,7993
4,0·10 <sup>-3</sup>	0,1773	0,6835	0,6833	0,695
8,0·10 <sup>-3</sup>	0,1459	0,5626	0,5705	0,5683
2,0·10 <sup>-2</sup>	0,1039	0,4006	0,4115	0,4012
4,0·10 <sup>-2</sup>	0,0779	0,3003	0,3009	0,299
8,0·10 <sup>-2</sup>	0,0580	0,2236	0,2095	0,2219
2,0·10 <sup>-1</sup>	0,0391	0,1507	0,1225	0,1505
4,0·10 <sup>-1</sup>	0,0289	0,1115	0,0791	
8,0·10 <sup>-1</sup>	0,0214	0,0824	0,0502	
1	0,0194	0,0748	0,0433	

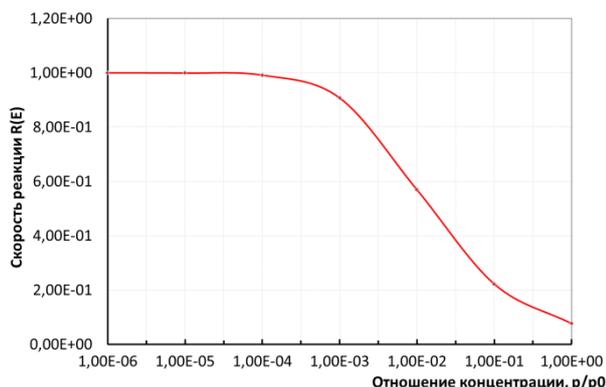


Рисунок 3. Зависимость скорости реакции  $R(E)$  от концентрации для  $Au$ -индикатора

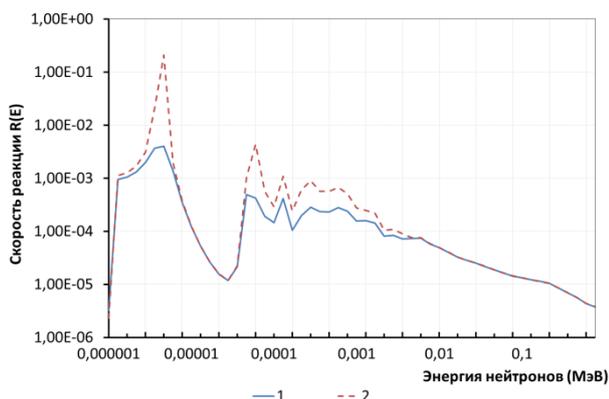


Рисунок 4. Зависимость скорости реакции  $R(n, \gamma)$  от энергии нейтронов для  $Au$ -индикатора (1 – концентрация  $\rho_0$ , 2 – концентрация  $\rho = \rho_0 \cdot 10^{-6}$ )

На втором этапе расчетов определялись зависимости скорости реакции  $R(E)$  от концентрации изотопа индикатора. Для того, чтобы определить плотность, соответствующую «бесконечному разбавлению» для расчета невозмущенной скорости реакции, была изучена зависимость реакции от концентрации  $N$ . График на рисунке 3 показывает изменение скорости реакции на атомах золота (этот материал имеет высокое резонансное сечение) в зависимости от концентрации. На графиках видно, что скорость ре-

акции увеличивается, при уменьшении плотности и его насыщение происходит при  $\rho = \rho_0 \leq 10^{-4}$ . По этой причине, во всех расчетах плотности для бесконечного разбавления предполагалось  $\rho = \rho_0 \cdot 10^{-6}$ .

На рисунке 4 приведены результаты расчета скоростей реакций для двух значений плотности (концентрации вещества  $\rho_0$  и  $\rho = \rho_0 \cdot 10^{-6}$ ). На графике четко просматривается эффект самопоглощения, показаны возмущенные и невозмущенные скорости реакции. Для бесконечного разбавленного образца поток нейтронов изменяется как  $1/E$ , и на графике скорости реакции виден хорошо выраженный пик.

### 3 ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Используя программу MCNP, были определены факторы резонансного самоэкранирования в АИ из золота радиуса  $R$ , используемых в качестве АИ при облучении. Эти факторы зависят от размерности индикатора и нейтронно-физических свойств материалов индикатора. Были получены зависимости поправочных коэффициентов от толщины индикатора, аналитические формулы для индикатора и зависимости скорости реакций от концентрации изотопов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований нейтронно-физических характеристик определены:

- Скорость реакции  $(n, \gamma)$  для АИ из золота;
- Зависимости поправочных коэффициентов самоэкранирования от толщины индикатора;
- Для аналитического метода подобраны формулы для расчета поправочных коэффициентов;
- Приведены изменения скорости реакции в зависимости от концентрации изотопов, показан эффект самоэкранирования.

Результаты расчетов используются при проведении НАА конструкционных материалов ядерной техники.

В дальнейшем планируется исследовать факторы резонансного самоэкранирования в других материалах активационных индикаторов, таких как тантал, медь, марганец, цирконий, индий и т.п.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Bries Tuli J.K. / Nuclear wallet cards // National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory, Upton, USA, 2000.
2. Briesmeister, J. F. / MCNP – a general Monte-Carlo Code for neutron and photon Transport / J.F. Briesmeister [et al.] – Los Alamos, 1997. – LA-7396M.
3. MacFarlane, R.E. / New Thermal Neutron Scattering Files for ENDF/B-VI Release 2. – Los Alamos, 1994. – LA-12639-MS
4. Ломакин С.С., Петров В.И., Самойлов П.С. Радиометрия нейтронов активационным методом. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 144 с.
5. Salgado J., Martinho E., Gonçalves I. F. / The calculation of neutron self-shielding factors of a group of isolated resonance // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2004. – Vol. 260(2). – P.317–320.
6. Goncalves I.F., Martinho E., Salgado J. / Extension to cylindrical samples of the universal curve of resonance neutron self-shielding factors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2004. – No. 213. – P. 186–188.
7. Goncalves I.F., Martinho E., Salgado J. / Monte Carlo calculation of epithermal neutron resonance self-shielding factors in foils of different materials // Applied Radiation and Isotopes. – 2002. – No.56. – P. 945–951.
8. Salgado J., Martinho E., Goncalves I. F. / Epithermal neutron self-shielding factors in foils for collimated beams // Applied Radiation and Isotopes. – 2004. – Vol.60. – P. 677–681.

9. Furcia H., Arribere M., Ribeiro Guevara S. / Self-shielding corrections in cylindrical samples in gamma spectrometry with germanium well-type detectors // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2013. – Vol. 705. – P. 132–139.
10. Tzika F., Stamatelatos I.E. / Thermal neutron self-shielding correction factors for large sample instrumental neutron activation analysis using the MCNP code // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2004. – Vol. 213. – P. 177–181.

### АЛТЫННАН ЖАСАЛҒАН АКТИВАЦИЯЛЫҚ ИНДИКАТОРЛАРДАҒЫ РЕЗОНАНСТЫҚ ӨЗДІГІНЕН ҚАЛҚАЛАНУ ФАКТОРЛАРЫН ЗЕРТТЕУ ЕСЕБІ

Ұ.А. Жұмаділова, И.В. Прозорова

*ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан*

Мақалада алтыннан жасалған активациялық индикаторлардағы реакция жылдамдығын ( $n, \gamma$ ), өздігінен қалқалану коэффициенттерінің индикатор қалыңдығына тәуелділігін анықтау бойынша жүргізілген нейтронды-физикалық есептеулерінің нәтижелері, аналитикалық әдіс үшін іріктелген формулалар, реакция жылдамдығының изотоптар концентрациясына байланысты өзгеруі, өздігінен қалқалану эффектісі көрсетілген. Жұмыстың өзектілігі k0-стандарттау біркомпараторлық әдісімен нейтронды-активациялық талдауда нейтронды индикатор ретінде қолданылатын алтыннан жасалған индикаторлардағы резонанстық қалқалану факторларын бағалау қажеттілігімен негізделген. Есептік зерттеу нәтижелері ядролық техника құрылысының материалдарын нейтронды-активациялық талдау өткізу кезінде қолданылуы мүмкін.

### COMPUTATIONAL STUDIES THE FACTORS OF RESONANCE SELF-SHIELDING IN THE ACTIVATION INDICATORS OF GOLD

U.A. Zhumadilova, I.V. Prozorova

*Institute of Atomic Energy Branch of the RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

The article presents the results of neutron-physics calculations on the calculation of the rate of reaction ( $n, \gamma$ ) in the activation indicators of gold, according to the correction factors self-shielding by the indicator thickness chosen formula for calculating the correction coefficients for an analytical method, changes in the rate of reaction depends on the concentration of isotopes, self-shielding effect. Relevance of the work due to the need to evaluate the factors of resonance self-shielding in the activation indicators of gold to be used during neutron activation analysis method one-comparator k0-standardization. The results of computational studies can be used to conduct neutron activation analysis of structural materials of nuclear engineering.

УДК 621.039

## ТЕПЛОВОЙ РЕАКТОР МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ВЫСОКИМ ВОСПРОИЗВОДСТВОМ ДЕЛЯЩИХСЯ ВЕЩЕСТВ

Иданова Д.С., Котов В.М.

*Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

В работе представлены технические решения, обеспечивающие высокие нейтронно-физические характеристики теплового реактора малой мощности и снижающие экономические затраты для выхода реактора на рабочий режим с использованием ториевого сырья.

Рассчитаны нейтронно-физические характеристики вариантов реактора, отличающихся типом топливного материала (металл и диоксид с одинаковой плотностью по урану), наличием слоев бериллия и висмута на границе зоны ТВС и их толщиной, составом и толщиной внешнего слоя отражателя.

Представлены преимущества теплового реактора, обеспечивающего полное использование природного урана, стабильность работы реактора и достижение высокого выгорания в топливе. Результат работы показывает возможность снижения затрат топливного сырья в тепловых реакторах до уровня, соответствующего затратам быстрых реакторов.

### ВВЕДЕНИЕ

Эффективность энергетических реакторов определяется затратами сырья на их работу и коэффициентом полезного действия цикла преобразования тепловой энергии в механическую.

Современная атомная энергетика в основном использует тепловые реакторы с урановым топливом с повышенным содержанием  $^{235}\text{U}$  в начале кампании (по отношению к природному). Такое топливо позволяет иметь достаточный коэффициент размножения для достижения величины выгорания свыше 30-50 МВт·сут/кг. Такой тип реакторов получился как бы сам собой в ходе достаточно короткого развития атомной энергетике, так как природный уран не обеспечивает желаемой продолжительности кампании, даже в реакторах с лучшим тяжеловодным замедлителем. Эффективная технология разделения изотопов для реакторов создана при решении задач военного назначения.

Известным недостатком тепловых реакторов является малое использование природного урана в ходе их работы 0.5÷1.0 %. Мировых запасов дешевых руд для работы таких реакторов хватает на 40-50 лет при мощности 4000 ГВт [1].

Следующим шагом в развитии атомной энергетике предлагается использование реакторов на быстрых нейтронах. Такой переход связан с увеличением содержания урана в топливе и обеспечивает возможность проведения реакций деления на быстрых нейтронах, вызывающих большее число вторичных нейтронов. Такая энергетика обеспечена достаточно дешевым топливом на многие сотни и тысячи лет.

Однако, такой путь развития имеет одну неприятную особенность - он чрезвычайно дорог. И, если его сторонники говорят, что дороговизна обусловлена недостатками современных технических решений, то они правы лишь наполовину. Непреодолимая дороговизна быстрой энергетике обусловлена

высокой потребностью в природном уране для её запуска. Для ввода в действие энергетике мощностью 4000 ГВт, которая сможет работать на такой мощности около 3000 лет, нужно переработать все дешевые запасы природного урана за 40-50 лет [2]. Это влечет за собой кроме экономических и экологические проблемы, проблемы нераспространения ядерных делющихся материалов.

### ТРЕБОВАНИЯ К РЕАКТОРАМ С ВЫСОКИМ ВОСПРОИЗВОДСТВОМ ДЕЛЯЩИХСЯ ВЕЩЕСТВ (ДВ)

Технология тепловых энергетических реакторов способна конкурировать по характеристикам использования ядерного сырья с быстрыми реакторами, а по ряду экономических показателей превосходить их, при внедрении следующих свойств в разрабатываемых реакторах:

- должен использоваться замкнутый топливный цикл;
- реактор должен иметь малые потери нейтронов в конструкционных материалах и на утечку;
- в ходе кампании желательна работа с равновесным содержанием нуклидов цепочки делющихся веществ;
- желательна использование нейтронов в части кампании с избытком реактивности для выработки делющихся веществ;
- желательность вовлечения тория, как для повышения числа вторичных нейтронов, так и для расширения сырьевой базы ядерной энергетике;
- желательна снижение наработки  $^{232}\text{U}$  при выработке  $^{233}\text{U}$ .

### ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ ТРЕБОВАНИЙ

Достижение минимальных потерь нейтронов связано с применением новых материалов с низким сечением поглощения нейтронов, в том числе изотопно-модифицированных материалов, среди которых обогащенный уран, тяжелая вода. Как правило,

новые материалы дороже предшественников, но их использование экономически выгодно.

Несколько сложнее дело обстоит с проблемой утечки. Основной путь достижения положительного результата здесь лежит в использовании реакторов больших габаритов. Естественно, что для большого реактора экономические затраты будут выше, чем для реактора меньших габаритов. В свою очередь, малые габариты реактора способствуют увеличению утечки, и, тем самым, препятствуют эффективной работе реактора с технологией высокого воспроизводства делящихся веществ. Это важно при создании демонстрационных реакторов, иллюстрирующих инновационные решения.

Вовлечение тория в ядерный топливный цикл сопряжено с большими затратами времени и средств, необходимыми для выработки  $^{233}\text{U}$ , достаточного для ведения рабочего процесса. Накопление  $^{233}\text{U}$  сопряжено с получением паразитного изотопа  $^{232}\text{U}$ , дочерние продукты которого имеют высокую энергию гамма-излучения. В работе [3] показано, что достаточно безопасный уровень выработки  $^{232}\text{U}$  находится на уровне ниже 1 кг на тонну получаемого  $^{233}\text{U}$ . В противном случае, требуется разработка и использование дорогостоящих автоматизированных систем переработки отработавшего топлива для извлечения из него  $^{233}\text{U}$  и, что не менее важно, возникают осложнения при работе с новым топливом, содержащим  $^{233}\text{U}$ .

Требование использования равновесного режима для нуклидов цепочки делящихся веществ при использовании уран-плутониевого топливного цикла входит в противоречие с тем фактом, что удовлетворительные характеристики кампании реактора достигаются при выгорании больше 30 МВт·сут/кг, а равновесное содержание  $^{233}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  в таком цикле близко к 0.3 % от содержания  $^{238}\text{U}$ . На рисунке 1 показаны характеристики размножения и воспроизводства уран-плутониевого и торий-уранового топлив вблизи области равновесия при нулевых потерях нейтронов. Такой реактор неработоспособен при реальных лучших конструкционных материалах.

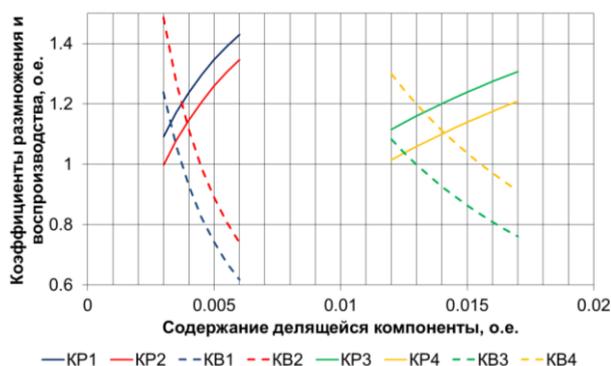


Рисунок 1. Коэффициенты размножения и воспроизводства в уран-плутониевом и торий-урановом топливах без потерь нейтронов

### ОПИСАНИЕ РАННЕЙ РАЗРАБОТКИ

В работах [4, 5, 6] были предложены технические решения, обеспечивающие реализацию большей части установленных требований.

О проблеме снижения накопления  $^{232}\text{U}$  при выработке  $^{233}\text{U}$ .

Так в [4] выработка  $^{233}\text{U}$  проводится за счет компенсации избытка нейтронов, имеющегося в определенные этапы кампании реактора. При этом для выработки  $^{233}\text{U}$  используются ториевые стержни, устанавливаемые в область замедлителя, наиболее удаленную от ТВС. В такой области поток быстрых нейтронов, вызывающий образование  $^{232}\text{U}$  за счет реакции  $(n,2n)$  на  $^{232}\text{Th}$  будет минимален, а поток тепловых - максимален. Конфигурация ячейки реактора, благоприятной для уменьшения накопления  $^{232}\text{U}$ , представлена на рисунке 2. Этим обеспечится малая выработка  $^{232}\text{U}$  на единицу выработанного  $^{233}\text{U}$ .

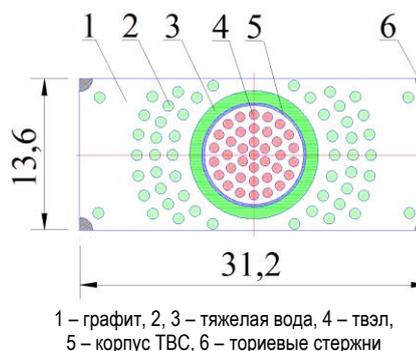


Рисунок 2. Прямоугольная решетка с тяжеловодно-графитовым замедлителем

Использование избыточных нейтронов в сумме с малыми потерями нейтронов в конструкционных материалах и на утечку позволяет вырабатывать в ходе кампании количество  $^{233}\text{U}$ , превышающее потребность в нем, даже при использовании в начальном топливе кампании урана из отвалов обогащенных производств. Кроме того, в кампании такого реактора реализуется равновесный режим плутониевых нуклидов, способствующий достижению высоких характеристик воспроизводства как уран-плутониевого, так и торий-уранового топлива. Однако, необходимость использования больших габаритов для снижения утечки, и, соответственно, большие затраты на его разработку оставляют открытыми вопросы создания такого демонстрационного реактора.

### ИДЕИ ИННОВАЦИОННОГО РЕШЕНИЯ

В настоящей работе использованы технические решения, снижающие экономические затраты, в том числе, на создание демонстрационного реактора, затраты времени для выхода на рабочий режим с использованием ториевого сырья. Причем, результат работы показывает возможность снижения затрат топливного сырья в тепловых реакторах до уровня,

соответствующего затратам быстрых реакторов. Основные идеи этих решений:

- часть ториевых поглотителей вводится в тяжеловодный отражатель;
- ТВС размещаются в зоне, не содержащей замедлителя нейтронов;
- на границе зоны ТВС вводится бериллий, обеспечивающий получение дополнительных нейтронов;
- на границе зоны ТВС вводятся слои висмута, обеспечивающие возврат быстрых нейтронов к ТВС;
- во внешнем слое отражателя устанавливается графит.

**КОНСТРУКЦИЯ РЕАКТОРА И ИССЛЕДУЕМЫЕ МОДИФИКАЦИИ**

Тепловой реактор является газоохлаждаемым канальным реактором. Теплоноситель – гелий. Выбор типа реактора обоснован в работах [7-8].

Для реализации принятых технических решений по программе [9] с использованием библиотеки ENDF/B-VI была разработана модель реактора для расчета его нейтронно-физических характеристик.

Исследованы два варианта конструкций ТВС, показанные на рисунке 3. Характеристики активной зоны 2 варианта реактора представлены в таблице 1.

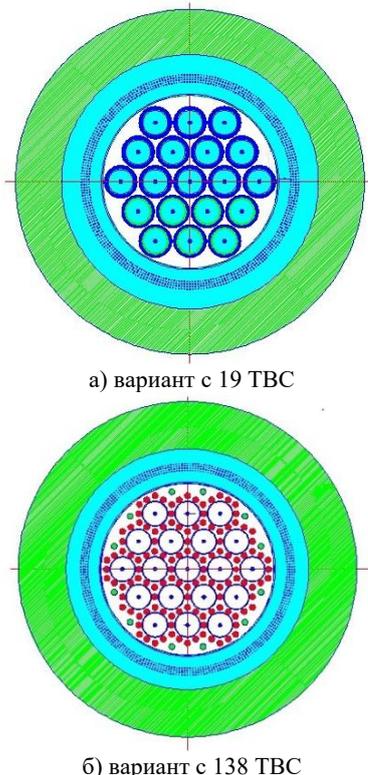


Рисунок 3. Варианты исполнения сотового реактора

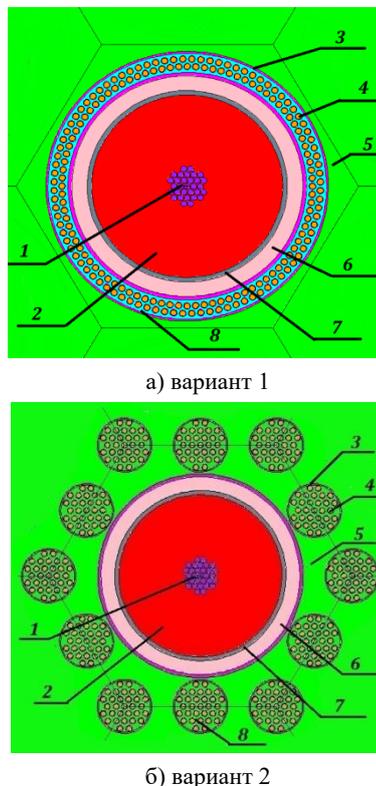
Вариант реактора с 19 ТВС отличается нетрадиционной конструкцией самой ТВС и их количеством в реакторе. Такая ТВС сложнее, имеет сравнительно большой внешний диаметр, кольцевую зону разме-

щения твэлов в 2 ряда и содержит внутри своего объема замедлитель нейтронов и ториевые компенсаторы реактивности. Конструкция имеет сложные устройства ввода и вывода теплоносителя, совмещенного с патрубками подачи и вывода замедлителя.

Таблица 1. Характеристики сотового реактора

	Параметр	Вариант 2
Активная зона	Высота активной зоны, см	180
	Диаметр активной зоны, см	204
	Количество ТВС	138
	Внешний диаметр ТВС, см	8
	Количество твэлов в ТВС	31
	Замедлитель	D <sub>2</sub> O – 95 %, H <sub>2</sub> O – 5 %
	Количество ториевых стержней	589
Торий	Высота ториевых стержней, см	180
	Диаметр ториевых стержней, см	0.8
Отражатель	Количество ториевых стержней	960
	Диаметр слоя D <sub>2</sub> O, см	285
	Внешний диаметр, см	385
	Высота ториевых стержней, см	230
	Высота отражателя из D <sub>2</sub> O, см	270
	Высота графитового отражателя, см	370

Вариант со 138 отдельными ТВС позволяет заполнить каналы теплоносителя и замедлителя по традиционным, более простым, решениям. Схемы расстановки элементов в решетке активной зоны вариантов ТВС представлены на рисунке 4.

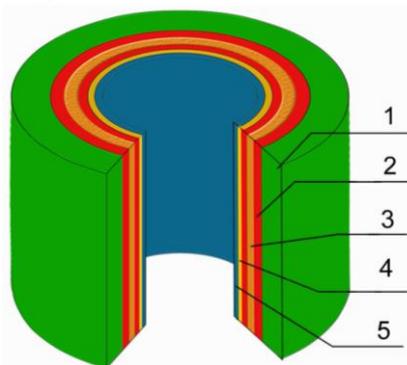


1 – ториевые стержни, 2 – тяжелая вода, 3 – оболочка ТВС, 4 – твэлы, 5, 8 – гелий, 6 – бериллий, 7 – висмут

Рисунок 4. Размещение элементов в решетке активной зоны

В обоих вариантах пространство, в котором размещены ТВС, не содержит замедлителя, что позволяет увеличить долю деления  $^{238}\text{U}$  на быстрых нейтронах, увеличить долю взаимодействия бериллия в реакции  $(n,2n)$ .

Боковой отражатель высотой 370 см и толщиной 97.76 см, состоит из слоя тяжелой воды (38.76 см) и слоя графита (56.5 см). Схема бокового отражателя представлена на рисунке 5.



1 – графит, 2 – тяжелая вода, 3 – ториевые стержни, 4 – висмут, 5 – бериллий

Рисунок 5. Боковой отражатель

На границе с активной зоной установлен слой бериллия толщиной 2 см. Между бериллием и тяжелой водой слой висмута толщиной 0.5 см. В тяжелой воде радиально размещены 4 ряда ториевых поглотителей высотой 230 см, по 240 в каждом ряду. Установка ториевых поглотителей в область отражателя создает дополнительный, выведенный за пределы активной зоны, слой для наработки делящихся веществ. Это решение способствует снижению утечки нейтронов и доли непроизводительной потери нейтронов в отражателе.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Нейтронно-физические расчеты варианта с отдельными ТВС показали его преимущества. Исследованы варианты реактора, которые отличаются типом топливного материала (металл и диоксид с одинаковой плотностью по урану), наличием слоев бериллия и висмута на границе зоны ТВС и их толщиной, составом и толщиной внешнего слоя отражателя. В таблице 2 приведены сравнения характеристик реактора для случая с графитом во внешнем слое отражателя, одинаковой толщиной бериллия и висмута и следующим составом делящихся веществ в топливе:  $^{233}\text{U}$  – 1.5 %,  $^{235}\text{U}$  – 0.7 %,  $^{239}\text{Pu}$  – 0.406 %,  $^{241}\text{Pu}$  – 0.082 %.

Анализ данных таблицы 2 показывает, что введение слоев бериллия и висмута положительно сказалось на коэффициенте воспроизводства в цепочке  $^{232}\text{Th}$  -  $^{233}\text{U}$ . Причем, потеря в коэффициенте размножения не окажет сильного влияния на характеристи-

ку воспроизводства этой цепочки при возможных корреляциях состава топлива.

Важным является также меньший уровень общих потерь нейтронов при наличии слоев бериллия и висмута и меньший уровень наработки  $^{232}\text{U}$  в  $^{233}\text{U}$ .

Имеются определенные преимущества металлического топлива над оксидным. Но свойства реактора с оксидным топливом вполне приемлемы.

Таблица 2. Сравнение характеристик основных вариантов реактора

Кол-во ТВС	Наличие Bi, Be	Параметр	Топливо – металл	Топливо – UO <sub>2</sub>
138	Есть	Кэфф	1.148	1.1287
		Потери нейтронов	7.62	7.95
		Утечка нейтронов	3.9138	3.8776
		КВ $^{232}\text{Th}$ - $^{233}\text{U}$	0.9667	1.0367
		КВ $^{238}\text{U}$ - $^{239}\text{Pu}$	1.0177	0.941
		Наработка $^{232}\text{U}$	157	145
	Нет	Делен/погл в $^{238}\text{U}$	14.78	12.69
		Кэфф	1.19394	1.1675
		Потери нейтронов	8.505	9.091
		Утечка нейтронов	3.4997	3.5346
		КВ $^{232}\text{Th}$ - $^{233}\text{U}$	0.819	0.873
		КВ $^{238}\text{U}$ - $^{239}\text{Pu}$	0.9497	0.9417
		Наработка $^{232}\text{U}$	181	175
		Делен/погл в $^{238}\text{U}$	14.32	12.25

Варианты реактора с наличием слоев бериллия и висмута на границе зоны ТВС обеспечивают расширенный уровень воспроизводства  $^{233}\text{U}$  и равновесный режим в цепочке плутониевых нуклидов при небольшой вариации состава топлива. Важной частью в этом является уровень деления в сырьевом  $^{238}\text{U}$ . Доли делений в топливных нуклидах представлены на рисунке 6.

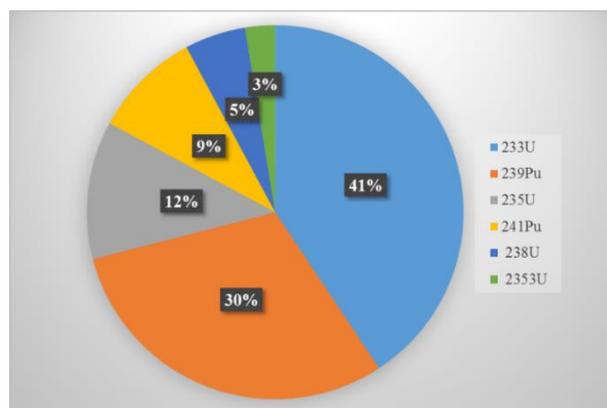


Рисунок 6. Доли делений в топливных нуклидах

На рисунке 7 представлены спектры нейтронов в топливе и в ториевых стержнях для прямоугольной и исследуемой решеток.

**ТЕПЛОЙ РЕАКТОР МАЛОЙ МОЩНОСТИ  
С ВЫСОКИМ ВОСПРОИЗВОДСТВОМ ДЕЛЯЩИХСЯ ВЕЩЕСТВ**

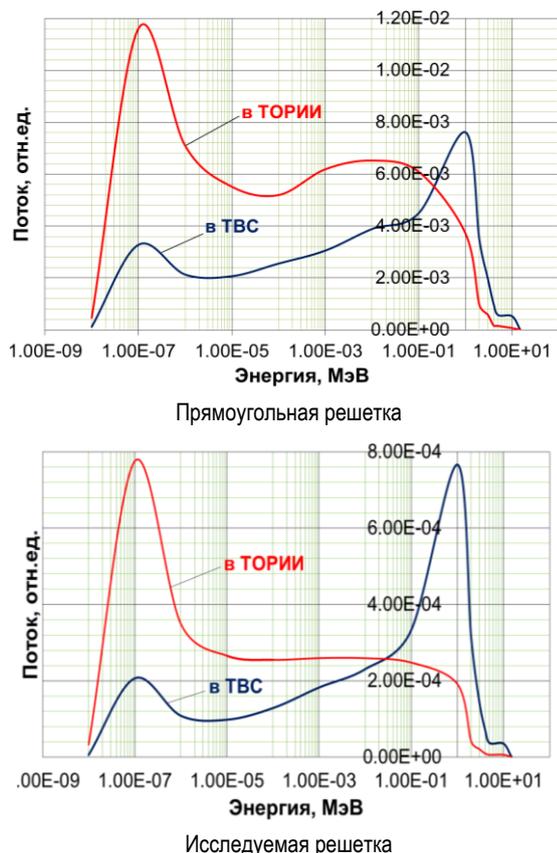


Рисунок 7. Спектры нейтронов в ТВС и тории

В решетке реактора со 138 ТВС, в сравнении с предыдущим решением, увеличен поток быстрых нейтронов в ТВС, и снижен в тории. Этим обеспечивается дальнейшее снижение выработки  $^{232}\text{U}$  на единицу выработанного  $^{233}\text{U}$ , а также увеличение доли деления  $^{238}\text{U}$  на быстрых нейтронах. Характерная величина отношения выработки  $^{232}\text{U}$  к выработке  $^{233}\text{U}$  находится на уровне 130 - 180 грамм на тонну (в индийском АНВР – 3 кг/тонну), деление в  $^{238}\text{U}$  составляет 12.25-14.78 % от поглощения в нем.

Проведенные расчеты вариантов кампаний реактора по программе [10] показали достижимым получение следующих характеристик (таблица 3).

Ограничение времени облучения тория уменьшает потери нейтронов в  $^{233}\text{Pa}$ , в  $^{233}\text{U}$ , улучшает радиационную обстановку при переработке, но вызывает увеличение количества перерабатываемого тория на единицу получаемого  $^{233}\text{U}$ . Противоположностью этому является повышение потока тепловых нейтронов. Важна величина выработки  $^{233}\text{U}$  на единицу массы тория. Характерное время облучения – 90 суток.

Для перевода  $^{233}\text{Pa}$  в  $^{233}\text{U}$  с полнотой 98 % требуется выдержка 120 суток. На рисунке 8 показана зависимость содержания  $^{232}\text{U}$  в 1 кг наработанного  $^{233}\text{U}$  при вариантах накопления  $^{233}\text{U}$  с различным временем облучения.

Сравнение характеристик исследуемого реактора с реактором CANDU в режиме обеспечения  $^{233}\text{U}$  [11]

и разрабатываемым индийским АНВР - 300 [12] показано в таблице 4.

Полученные характеристики позволяют говорить о существенных преимуществах разработанного реактора над известными.

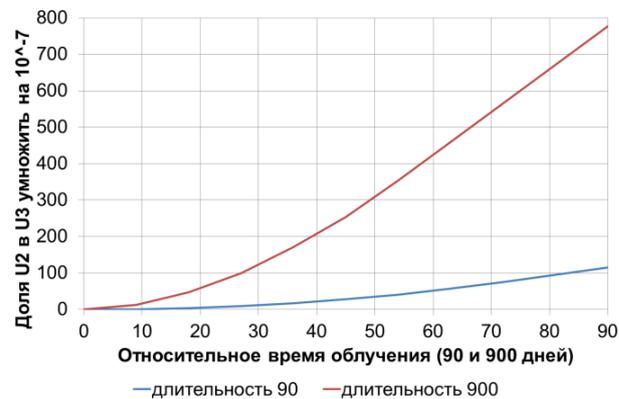


Рисунок 8. Зависимость содержания  $^{232}\text{U}$  в 1 кг  $^{233}\text{U}$  при вариантах накопления  $^{233}\text{U}$  с различным временем облучения

Таблица 3. Характеристики кампаний реактора

Характеристика	Значение
Масса уранового топлива, кг	2640
Масса тория эффективная, кг	2471
Содержание ДВ в урановом топливе, %	2.688
Длительность кампании, час	16 000 (1.82 года)
Потребность в природном уране для 1 кампании, кг	1436
Потребность в уране из отвалов для 1 кампании, кг	1204
Содержание $^{235}\text{U}$ в отвалах, %	0.02
Потребность в $^{233}\text{U}$ , кг	42.58
Потребность в $^{239}\text{Pu}$ и $^{241}\text{Pu}$ , кг	15.75
Потребность в природном уране для 2-ой и далее кампаний, кг	1344
Удаление отработавшего топлива из цикла в кампании, кг	1196
Потребность в тории для 2-ой и далее кампаний, кг	28.4
Выгорание в кампании, %	2.7 (71.3 кг)
Доля делений на уран-плутониевом топливе, %	56.72
Доля делений на торий-урановом топливе, %	43.28
Время достижения работоспособности, лет	2.3

Таблица 4. Сравнение исследуемого реактора (со 138 ТВС) с реакторами CANDU и АНВР

Параметр	АНВР	CANDU	Исследуемый
Электрическая мощность, МВт	300	137	45
Масса топлива, тонн	~95	95	2.64
Глубина выгорания, МВт-сут/кг	38	7	> 30
Содержание ДВ в начальном топливе, %	19.75 (ср.4.21)	0.72	2.688
Масса тяжелой воды, т	200	200	14
Наработка $^{232}\text{U}$ в $^{233}\text{U}$ , г на тонну	3000	> 3000	< 185
Выход на результат за Т·W, о.е.	~1.0	1.0	0.024
Теплоноситель	кипящая легкая вода	тяжелая вода	гелий
Оболочка твэлов и ТВС	циркалой		

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ полученных данных показал снижение экономических затрат и высокие нейтронно-физические характеристики благодаря следующим факторам:

- топливо размещено в зоне с повышенным потоком быстрых нейтронов;
- дополнительная часть нейтронов (~ 2 %) получается от реакции (n,2n) на бериллии;
- слои висмута обеспечивают возврат быстрых нейтронов в зону ТВС;
- отсутствует дорогостоящее изотопное обогащение топлива;
- накопление  $^{233}\text{U}$  отделено от топливного цикла;
- облучение тория ведется в потоке тепловых нейтронов больше, чем их поток в топливе;
- облучение тория ведется в потоке быстрых нейтронов меньше, чем их поток в топливе;
- существенная часть  $^{233}\text{Pa}$  выводится из облучения в ходе выдержки (уменьшая потери);
- $^{233}\text{U}$  выделяется из тория при малом количестве продуктов деления и  $^{232}\text{U}$ ;
- утечка нейтронов снижена за счет установки тория в отражатель;
- оптимизирована конфигурация отражателя в варианте размещения графита в его внешнем слое.

В проведенных расчетах имеется избыток реактивности (2.4 %) в начальный период работы реактора. Полное использование такого избытка нейтронов позволило бы получить такое количество  $^{233}\text{U}$ , которое заменит используемый в приведенных расчетах  $^{235}\text{U}$ .

Тем самым будет снижена потребность в природном уране при получении топлива последующих

кампаний до уровня приведенной потребности в тории, или потребности в нем быстрых реакторов.

Будет уменьшена масса урана, уходящая на долговременное хранение.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена концепция теплового реактора, который имеет ряд преимуществ по сравнению с предыдущими разработками по данной тематике.

Решение по размещению ТВС в зоне без замедлителя повышает долю делений  $^{238}\text{U}$  на быстрых нейтронах, которая превышает 12 % от поглощений в нем, большая величина делений на уран-плутониевом топливе и стабильность этого процесса обеспечивают высокое выгорание. Ввод на границах ТВС слоев бериллия и висмута положительно воздействует на коэффициент воспроизводства в цепочке  $^{232}\text{Th} - ^{233}\text{U}$ , так что 90 %  $^{233}\text{U}$  для следующей кампании накапливается в ходе текущей кампании.

Это позволяет увеличить долю природного урана, используемого в ходе работы, снижает радиационную опасность от  $^{232}\text{U}$  до приемлемых значений для переработки отработавшего топлива без создания специальных автоматизированных систем.

Тепловой реактор при малых габаритах имеет небольшие общие потери нейтронов ~ 7.62 %, в связи с наличием в тяжеловодном отражателе ториевых поглотителей нейтронов и внешнего графитового слоя. Такой реактор может использоваться для демонстрации возможностей вовлечения тория в топливный цикл. К тому же, используется хорошо отработанная технология уранового топлива, для которого, в том числе, существует отлаженная технология переработки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Адамов Е.О., Большов Л.А., Ганев И.Х. и др. Белая книга атомной энергетики.– Москва, Россия, 2001.– С. 270.
2. Пономарев-Степной Н.Н., Алексеев П.Н., Давиденко В.Д. и др. Сравнение направлений развития ядерной энергетики в XXI в. на основе расчетов материальных балансов. // Атомная энергия – 2001.– Вып. 5.– С. 331–336.
3. Троянов М.Ф., Илонин В.Г., Калашников А.Г. и др. Некоторые исследования и разработки ториевого топливного цикла.– Атомная энергия – 1998.– Вып. 4.– С. 287–293.
4. Иданова Д.С., Котов В.М. Исследование нейтронно-физических характеристик газоохлаждаемого канального реактора // Вестник НЯЦ РК – 2015.– Вып. 3.– С. 26–31.
5. Котов В.М. Способ работы канального ядерного реактора и реактор для его осуществления. № 2015/0847.1.
6. Котов В.М., Витюк В.А., Иданова Д.С., Сураев А.С., Ерыгина Л.А. АЭС на основе газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем // Материалы научно-технической конференции «Нейтронно-физические проблемы ядерной энергетики», Обнинск, Россия, 12-16 октября 2015.– 2015.– С. 34–35.
7. Котов В.М. Газоохлаждаемый реактор с паровой машиной Ренкина. № 26118 от 20.06.2012 г.
8. Котов В.М., Витюк Г.А., Сураев А.С. Возможности газоохлаждаемых реакторов с водяным замедлителем // Атомная энергия – 2014.– Вып. 1.– С. 6–10.
9. MCNP/5: A General Monte Carlo N – Particle Transport Code, Version 5, 2003.
10. Котов В.М., Иркимбеков Р.А. Расчет характеристик кампании энергетических реакторов. // Вестник НЯЦ РК – 2011.– Вып. 3.– С. 14 – 17.
11. Бергельсон Б.Р., Герасимов А.С., Тихомиров Г.В., Ли Цзиньхун. Режим само-обеспечения топливом ( $^{233}\text{U}$ ) для тяжеловодного энергетического реактора типа CANDU // Атомная энергия – 2004.– Вып. 4.– С. 269 – 275.
12. ANWR-300-LEU Advanced Heavy Water Reactor with LEU-Th MOX Fuel. Bhabha Atomic Research Centre Department of Atomic Energy.– Mumbai, India.– 12 p.

**БӨЛІНЕТІН ЗАТТАРДЫ ЖОҒАРЫ ӨНДІРГІШТІ ТӨМЕН ҚУАТТЫ  
ЖЫЛУ РЕАКТОРЫ**

**Д.С. Иданова, В.М. Котов**

*ҚР ҰАӨ РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан*

Жұмыста төмен қуатты жылу реакторының нейтронды-физикалық сипаттарының жоғары көрсеткіштерін және реактордың торий шикізатын пайдаланумен жұмыс режиміне шығуы үшін экономикалық шығындарды төмендетуді қамтамасыз ететін техникалық шешімдері берілген.

Отындық материалдардың түрімен (металл және уран бойынша бірдей тығыздығы бар диоксид), ЖБЖ зонасының шебінде бериллий және висмут қабаттарының бар болуымен және олардың қалыңдығымен, шағылыстырудың ішкі қабатының құрамы және қалыңдығымен ерекшеленетін реактордың нейтрондық-физикалық сипаттарының нұсқалары есептелген.

Табиғи уранды толығымен пайдалануды, реактордың жұмысының тұрақтылығын және отында жоғары жанып бітуге қол жеткізуді қамтамасыз ететін реактордың нұсқасының басымдылығы берілген. Жұмыстың нәтижесі, жылу реакторларында отындық шикізаттардың шығынын жылдам реакторлар шығына сәйкес деңгейге дейін төмендету мүмкіндігін көрсетті.

**THERMAL LOW-POWER REACTOR  
WITH HIGH REPRODUCTION OF FISSILE MATERIALS**

**D.S. Idanova, V.M. Kotov**

*Institute of Atomic Energy Branch of the RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

The paper presents technical solutions which ensure high performance of thermal low-power reactor's neutron-physical characteristics and reduce the economic costs to output of the reactor to an operating mode using thorium raw materials. Neutron-physical characteristics of the reactor variations, which have different types of fuel material (metal and dioxide with the similar uranium density), the presence of beryllium and bismuth layers on the border of FA and its thickness, composition and thickness of outer layer of the reflector are computed.

Advantages of the reactor that ensures full usage of natural uranium, reactor operation stability and high fuel burn up reaching are presented. The result of work shows the possibility to reduce the use of raw materials in thermal reactors to a level corresponding to the fast reactors.

УДК 533.9.08

## СИСТЕМА ПРЕДЫОНИЗАЦИИ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО ПУСКА ТОКАМАКА КТМ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА

Шаповалов Г.В., Тарасенко Е.В., Кусаинов А.Т.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В статье представлены результаты расчетных исследований для обеспечения физического пуска токамака КТМ, разработка электрической схемы и макетирование высоковольтного источника питания системы СВЧ-предыонизации, подключение и настройка магнетрона к высоковольтному источнику питания с получением СВЧ-излучения.

Система резонансной СВЧ-предыонизации обеспечит ионизацию и надежный «пробой» газа в заданной области камеры на физическом пуске токамака КТМ. Также будет приобретен уникальный опыт экспериментальных работ на высокотехнологичной научно-исследовательской установке, которая будет использована в дальнейшем в исследованиях по физике плазмы токамака КТМ и в материаловедческих исследованиях на токамаке КТМ.

### ВВЕДЕНИЕ

Одна из проблем, которую необходимо решить на начальной стадии разряда на токамаке КТМ – это ионизация газа и получение затравочных электронов в заданной области камеры. В мировой практике давно существует простой и надежный способ решения данной проблемы – это применение СВЧ-предыонизации на частоте электронно-циклотронного резонанса. В качестве СВЧ-предыонизации используют систему на основе мощных СВЧ-устройств, таких как магнетроны, клистроны, гиротроны и т.п.

Из литературных источников [1] известно, что при использовании СВЧ-предыонизации на частоте электронно-циклотронного резонанса достигается ряд преимуществ по сравнению с омическим пробоем:

- расширяется рабочая область давлений рабочего газа и уменьшается напряжение на обходе;
- положение плазменного шнура с током контролируется местом выделения СВЧ мощности, что упрощает задачу управления положением плазмы на стадии пробоя;
- уменьшается длительность пробоя и связанные с этим затраты магнитного потока.

На сегодняшний день на токамаке КТМ ведутся работы по подготовке к физическому пуску. На данный момент токамак КТМ работает на пониженных параметрах, так как не подключено внешнее электроснабжение – максимальный ток в тороидальной обмотке достигает 6 кА, что составляет 10% от номинального значения. Центральный соленоид и полоидальные обмотки токамака запитываются от конденсаторных батарей большой емкости. Для надежной предыонизации на этапе физического пуска токамака КТМ необходима резонансная система СВЧ-излучения с учетом токов в тороидальной обмотке на уровне 10-15 кА.

### РАСЧЕТНЫЕ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ И ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ СВЧ-ПРЕДЫОНИЗАЦИИ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО ПУСКА ТОКАМАКА КТМ

#### Расчет магнитного поля внутри камеры КТМ

Для определения частоты электронно-циклотронного резонанса на физическом пуске токамака КТМ необходимо задать токи в тороидальной катушке, по которым можно найти магнитное поле в камере токамака КТМ, а затем по магнитному полю вычислить частоту электронно-циклотронного резонанса.

На этапе физического пуска токамака КТМ токи в тороидальной обмотке будут на уровне 10-15 кА. На эти токи и будет проводиться расчет электронно-циклотронного резонанса. На первоначальном этапе пуска токамака КТМ планируется получить область пробоя на внутреннем обводе вакуумной камере, что соответствует диапазону резонансного магнитного поля от 0,4 м до 0,8 м. С учетом исходных данных рассчитаем тороидальное магнитное поле по формуле (1) [2].

$$B_t = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I_t}{2 \cdot \pi \cdot R_{рез}}, \quad (1)$$

где  $N$  – количество тороидальных витков 80;

$I_t$  – ток тороидальной обмотки, от 10 до 15 кА;

$R_{рез}$  – радиус резонанса от 0,4 до 0,8 м;

$\mu_0$  – магнитная постоянная,  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Г/м.

На рисунке 1 представлены результаты расчета тороидального магнитного поля по формуле 1 при токах в тороидальных обмотках от 10 до 15 кА с шагом в 1 кА.

Из рисунка 1 видно, что с увеличением тока в тороидальной обмотке, увеличивается тороидальное магнитное поле в камере токамака КТМ.

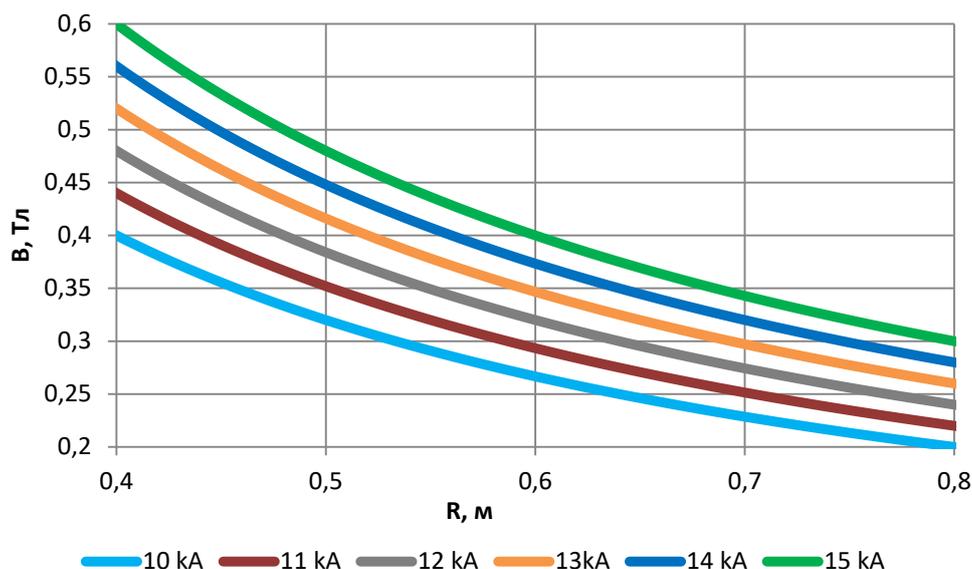


Рисунок 1. Тороидальное магнитное поле в камере токамака КТМ

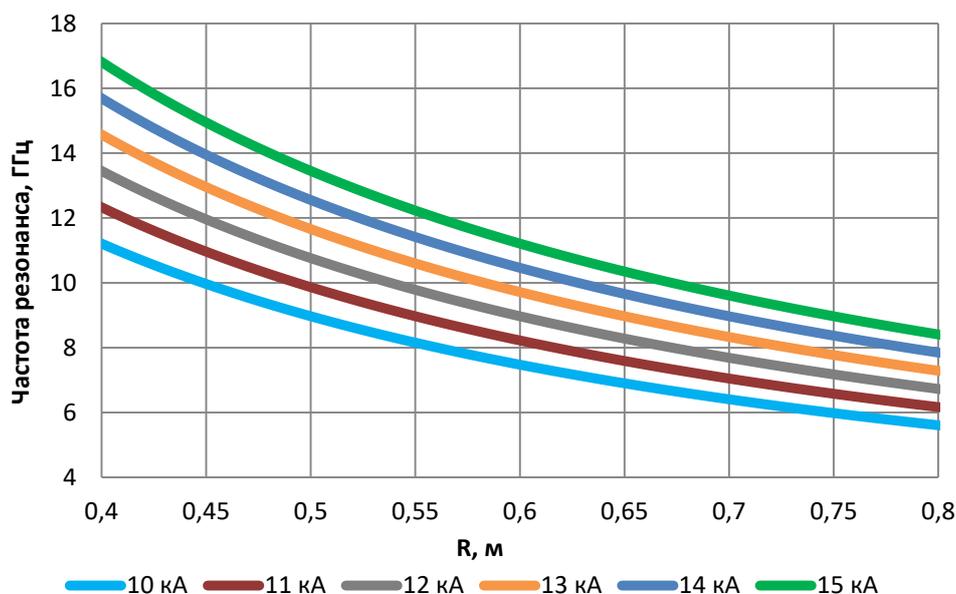


Рисунок 2. Электронно-циклотронный резонанс в камере токамака КТМ

#### Расчет электронно-циклотронного резонанса

Расчет электронно-циклотронного резонанса выполнен по формуле (2)

$$\omega_{ce} = \frac{e \cdot B_t}{m_e} \approx \frac{1,76 \cdot 10^{11} \cdot B_t}{2\pi}, \quad (2)$$

где  $\omega_{ce}$  – в электронная циклотронная частота,  $\omega$ ;  
 $B_t$  – тороидальное поле, Тл;  
 $e$  – заряд электрона, Кл;  
 $m_e$  – масса покоя электрона, кг.

На рисунке 2 представлены результаты расчета электронно-циклотронного резонанса по формуле (2).

Из рисунка 2 видна зависимость частоты от токов в тороидальной обмотке токамака КТМ.

#### Расчет номинальной мощности СВЧ излучения

Для выбора магнетрона необходимо определить его мощность, достаточную для ионизации газа в камере токамака КТМ. Из литературных источников [1] известно, что необходимым условием для ионизации водорода является придание электронам энергии около 1 кэВ. Из этих условий по формуле 3 можно рассчитать необходимую мощность магнетрона на физическом пуске токамака КТМ.

**СИСТЕМА ПРЕДЫОНИЗАЦИИ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО ПУСКА ТОКАМАКА КТМ  
НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА**

$$P_{ECR} \approx S_{ECR} \cdot \omega_{ce}^2 \cdot \left( \frac{W_{e\perp}}{6 \cdot 10^7} \right)^3 \quad (3)$$

где  $P_{ECR}$  – вводимая в плазму СВЧ мощность, МВт;  
 $W_{e\perp}$  – энергия электронов в области резонанса с учётом релятивистского изменения циклотронной частоты равная – 1 кэВ;  
 $S_{ECR}$  – поперечное сечение пучка СВЧ-излучения;  
 $\omega_{ce} = 2\pi f_0$  – круговая частота волны, равная в области резонанса циклотронной частоте.

Из рисунка 3 видно, что максимальный диаметр СВЧ-излучения магнетрона будет около 0,8 метров, что соответствует поперечному сечению пучка СВЧ-излучения около  $0,5 \text{ м}^2$ .

На рисунке 4 представлены графики номинальной мощности СВЧ-излучения рассчитанные по формуле 3 при поперечном сечении пучка СВЧ-излучения равном  $0,5 \text{ м}^2$ . Из рисунка 4 можно сделать

вывод, что при радиусе резонанса 0,6 метра необходимо вложить мощность СВЧ-излучения от 5 кВт до 12 кВт. Такую мощность необходимо вложить непосредственно в газ, который необходимо ионизировать (водород), поэтому надо учесть потери при движении СВЧ-излучения от магнетрона в камеру токамака КТМ. Потери будут складываться из следующих составляющих: это волновод и элементы передающего тракта волновода, а также прохождения СВЧ-излучения через окно смотрового патрубка токамака КТМ. Исходя из условия максимальных потерь и технических характеристик, можно предположить, что потери в волноводе и элементах передающего тракта волновода составят 10%, а потери через окно смотрового патрубка будут складываться из отражения и поглощения СВЧ-излучения от стекла и составит около 40% [2]. Общие потери составят 50%, следовательно, необходим источник СВЧ-излучения мощностью не менее 20 кВт.

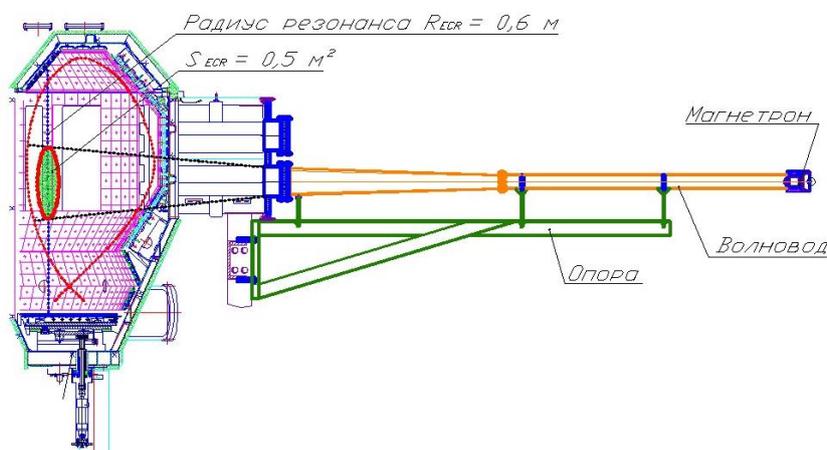


Рисунок 3. Поперечное сечение пучка СВЧ-излучения в вакуумной камере токамака КТМ

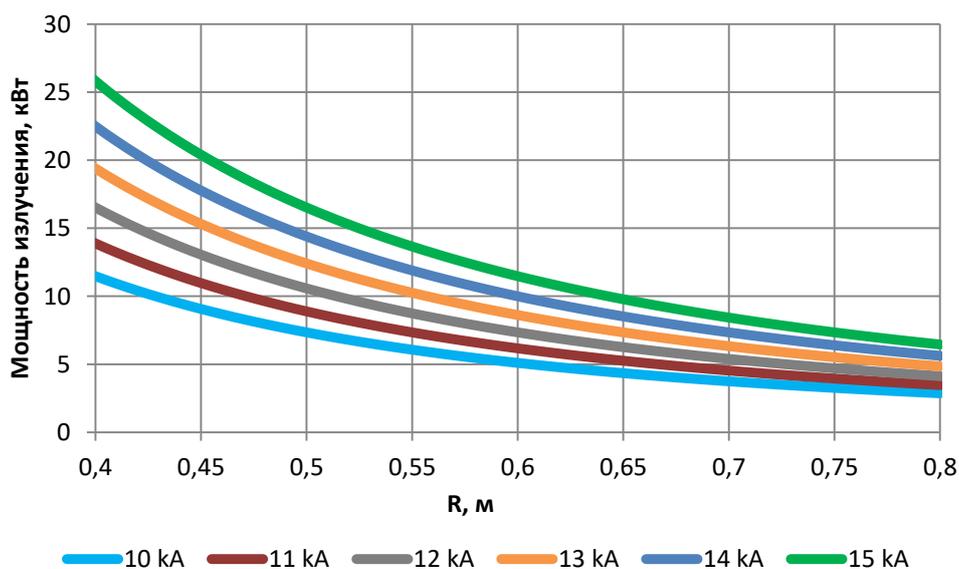


Рисунок 4. Номинальная мощность СВЧ-излучения на физическом пуске КТМ

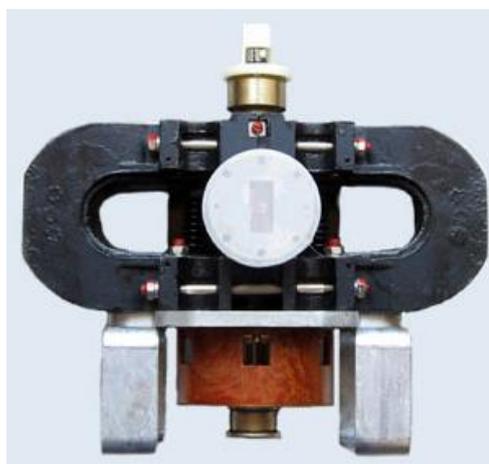
### ВЫБОР ИСТОЧНИКА СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

В качестве источника СВЧ-излучения могут использоваться магнетроны, клистроны, гиратроны и другие мощные электровакуумные СВЧ приборы. Наиболее распространенный вариант использования в системах предыонизации на токамаках получили магнетроны. Магнетроны являются, генераторами электромагнитных колебаний, в настоящее время рассчитаны для работы в диапазоне частот 0.3-300 ГГц с выходной мощностью в импульсе 10 Вт до 10 МВт. КПД магнетрона может достигать 80 %. Магнетроны как генераторы сверхвысоких частот широко используются в современной радиолокационной технике. Магнетроны в качестве системы предыонизации используются на токамаках Глобус-М, NSTX, MAST, COMPASS и многих других [2,3,4,5].

Основными характеристиками при выборе магнетрона были следующие параметры: частота, мощность, время излучения, применение на других токамаках и его стоимость. Исходя из данных полученных в ходе расчета показанных выше, можно сделать следующий вывод: необходим магнетрон частотой до 10 ГГц, мощностью не менее 20 кВт. Время воздействия СВЧ-излучения должно быть достаточно для надежной ионизации газа. Известно, что для ионизации газа необходимо около 50 мкс [1]. Таким образом, нет необходимости в постоянном воздействии СВЧ-излучения на газ, а достаточно импульсного воздействия в течение 1 мс. Этого времени будет достаточно для ионизации газа и облегчения пробы, а также для визуального контроля и фиксации данного события на диагностическое оборудование токамака КТМ. Исходя из этого, на многих токамаках выбирают в качестве предыонизации стандартные импульсные магнетроны, работающие в радиолокационных станциях. Производство таких магнетронов хорошо налажено, вследствие этого их стоимость заметно ниже остальных электровакуумных приборов СВЧ. Однако у данных магнетронов есть своя особенность: импульс СВЧ-излучения составляет около 1 мкс и повторяется через 1 мс – это меньше времени ионизации 50 мкс. Решением в данном случае является уменьшение мощности магнетрона, которая достигает в импульсе несколько сотен киловатт, путем уменьшения анодного напряжения и увеличением его длительности. С этой целью, необходимо разработать формирователь высоковольтного импульса магнетрона, главной задачей которого будет увеличение импульса СВЧ-излучения до 1 мс. Исходя из всего выше изложенного и опираясь на работы, проделанные на других токамаках, был выбран импульсный радиолокационный магнетрон большой мощности МИ-99А [5]. Технические характеристики магнетрона приведены в таблице 1. На рисунке 5 приведена фотография магнетрона МИ-99А.

*Таблица 1. Технические характеристики магнетрона МИ-99А*

Наименование параметра	Значение
Рабочий диапазон частот, МГц	9150-9610
Мощность импульсная выходная, кВт	~ 270
Мощность средняя выходная, Вт	~ 220
Напряжение анода, кВ	24,1
Ток анода, А	до 28
Длительность импульса, мкс	0,25-1,1
Габариты, мм	270×160×265
Масса, кг	12
Вывод энергии волноводный, мм	12,6×28,5
Напряжение накала, В	15
Ток накала, А	4



*Рисунок 5. Внешний вид магнетрона МИ-99А*

### ВЫБОР ВОЛНОВОДА И ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛНОВОДА

Одним из важных элементов в системе СВЧ-предыонизации плазмы токамака КТМ является волновод. Волновод предназначен для передачи энергии от генератора к нагрузке в СВЧ диапазоне. Параметры волновода зависят от параметра источника СВЧ-излучения в данном случае от магнетрона МИ-99А.

Из технических характеристик на магнетрон (таблица 1) найдены необходимые параметры для выбора волновода: внутреннее сечение прямоугольного волновода 12,6×28,5 мм, диапазон частот до 10 ГГц, передаваемая импульсная мощность до 270 кВт. Данным характеристикам соответствует стандартный прямоугольный волновод WR112. Как известно в прямоугольном волноводе основным типом волны является волна  $H_{10}$  [6, 7].

С целью повышения надежности работы магнетрона и измерения мощности СВЧ-излучения в волновод ставят дополнительные элементы [6, 7]: ферритовый вентиль для защиты магнетрона от обратной волны, ответвитель мощности для контроля и измерения мощности СВЧ-излучения, рупорную антенну для согласования волновода с окружающей средой (воздухом) в открытом раструбе.

**РАЗРАБОТКА СХЕМЫ И МАКЕТИРОВАНИЕ  
ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ  
СИСТЕМЫ СВЧ-ПРЕДЫОНИЗАЦИИ**

Целью макетирования высоковольтного источника питания системы СВЧ-предыонизации является получение номинальных вольт-амперных характеристик для работы магнетрона.

Для макетирования высоковольтного источника питания была разработана электрическая схема, изображенная на рисунке 6, и изготовлены следующие элементы: повышающий импульсный трансформатор, зарядное устройство до 5 кВ, высоковольтный тиристорный ключ с гальванической развязкой по управлению, эквивалент нагрузки (вместо магнетрона), измеритель тока.

Для проведения работ с макетом высоковольтного источника питания системы СВЧ-предыонизации в качестве нагрузки использовали высоковольтные резисторы (тип ВС) разных номиналов от 1 кОм до 1 МОм и разные конденсаторные сборки емкостью от 470 пФ до 100 мкФ. Результаты работы показали, что уже при емкости конденсатора 0,25 мкФ и со-

противлении нагрузки 10 кОм достигаются рабочие напряжения генерации электромагнитных волн в магнетроне (рисунок 7). Повышение емкости конденсаторной батареи и сопротивления нагрузки только усиливают этот эффект – увеличивается длительность импульса и напряжение на нагрузке.

**СБОРКА И НАСТРОЙКА МАГНЕТРОНА**

Сборка и настройка магнетрона, как и в случае с макетом высоковольтного источника питания, выполнена по такой же схеме (рисунок 6), только вместо активной нагрузки подключается магнетрон МИ-99А. Подключение магнетрона к высоковольтному источнику питания показана на рисунке 8. Для проверки работоспособности магнетрона, а именно генерации мощных электромагнитных волн, необходимо использовать дополнительные датчики. С этой целью для измерения СВЧ-излучения используется датчик-СВЧ, схема которого изображена на рисунке 9. Он состоит из детекторного СВЧ-диода, конденсатора, проволочной петли выполняющей функцию антенны и осциллографа.

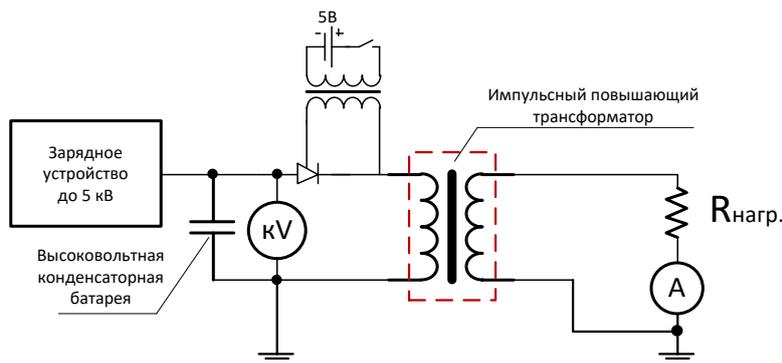


Рисунок 6. Электрическая схема формирователя высоковольтного импульса напряжения

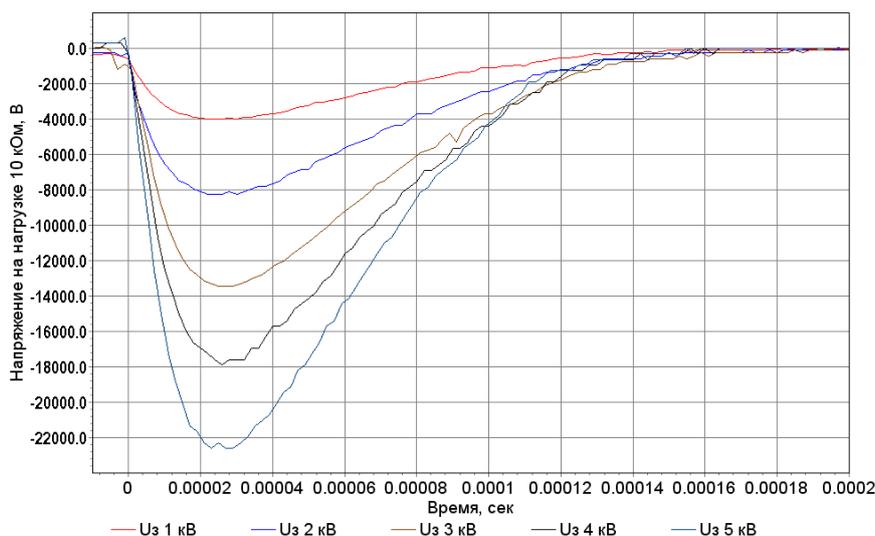


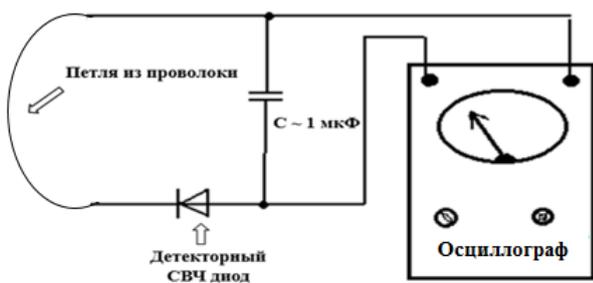
Рисунок 7. Экспериментальные данные макета источника питания системы СВЧ-предыонизации на нагрузке 10 кОм с конденсатором емкостью 0,25 мкФ

**СИСТЕМА ПРЕДЫОНИЗАЦИИ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО ПУСКА ТОКАМАКА КТМ  
НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА**



1 – магнетрон МИ-99 А, 2 – волновод, 3 – рупорная антенна, 4 – повышающий трансформатор, 5 – высоковольтный тиристорный ключ, 6 – конденсатор, 7 – амперметр, 8 – датчик СВЧ, 9 – люминесцентная лампа.

*Рисунок 8. Подключение магнетрона к высоковольтному источнику питания системы СВЧ предыонизации*



*Рисунок 9. Схема для обнаружения СВЧ излучения*

Для надежной индикации СВЧ-излучения без электронных средств измерения, применяется люминесцентная лампа, которая устанавливается на выходе СВЧ-излучения из рупорной антенны. При прохождении электромагнитной волны в люминесцентной лампе возникает электрический пробой и ионизация паров ртути, что приводит к свечению люминесцентной лампы и удобной визуализации прохождения через лампу СВЧ-излучения от магнетрона.

Экспериментальные данные, полученные при работе с магнетроном МИ-99А, представлены на рисунке 10. Из рисунка видно, что достигнуты режимы генерации магнетрона длительностью до 1,4 мс при следующих параметрах конденсаторной батареи: емкость 1 мкФ, напряжение 4 кВ. При этом максимальный ток анода магнетрона составляет 6,5 А. Показания датчика-СВЧ подтверждают, что длительность СВЧ-излучения соответствует 1,4 мс.

Из полученных данных также можно получить расчетные оценки импульсной мощности СВЧ-излучения. Для этого необходимо определить КПД магнетрона. Из технических характеристик на магнетрон (таблица 1) находим:

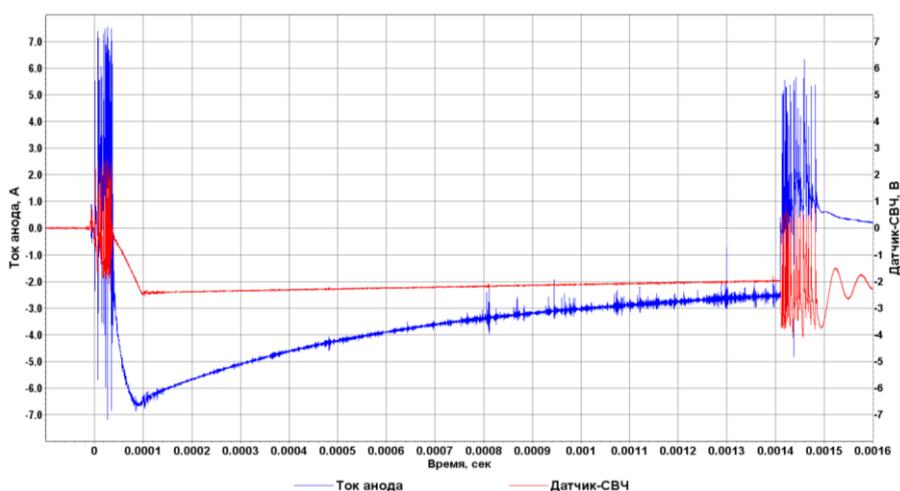
$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{P_{\text{вых}}}{UI} \quad (4)$$

где  $P_{\text{вых}}$  – мощность выходная импульсная, Вт;  
 $P_{\text{вх}}$  – мощность входная, Вт;  
 $U$  – напряжение анода, В;  
 $I$  – максимальный ток анода, А.

Из формулы (4) получаем:

$$\eta = \frac{270 \cdot 10^3}{24,1 \cdot 10^3 \cdot 28} = 40 \%$$

КПД магнетрона составляет 40 %.



*Рисунок 9. Экспериментальные данные при работе с магнетроном МИ-99А, конденсаторная батарея емкостью 1 мкФ, напряжение на батарее – 4 кВ*

Из полученных экспериментальных данных определяется импульсная мощность СВЧ-излучения при максимальном КПД магнетрона 40% по формуле:

$$P = \eta \cdot U \cdot I \quad (5)$$

где  $P$  – импульсная мощность, Вт;  
 $\eta$  – КПД магнетрона;  
 $U$  – напряжение анода, В;  
 $I$  – максимальный ток анода, А.  
Из формулы (5) получаем:

$$P = 0,4 \cdot 24100 \cdot 6,5 = 62660 \text{ Вт}$$

Таким образом, импульсная мощность СВЧ-излучения полученная расчетным путем, при максимальном КПД магнетрона 40 % составляет 62660 Вт.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работ по системе СВЧ-предыонизации для физического пуска токамака КТМ на основе электронно-циклотронного резонанса были получены следующие результаты:

1. Определены расчетные параметры необходимые для работы системы СВЧ-предыонизации на физическом пуске токамака КТМ: тороидальные магнитные поля, частота электронно-циклотронного резонанса и номинальная мощность СВЧ-излучения.

2. Выбраны элементы системы резонансной СВЧ-предыонизации для обеспечения физического пуска токамака КТМ: источник мощного СВЧ-излучения – импульсный магнетрон МИ-99А (частота

излучения 9,6 ГГц, мощность импульсного излучения до 270 кВт) и алюминиевый прямоугольный волновод WR-112 (внутреннее сечение 28.5×12.6 мм, частотный диапазон пропускания СВЧ-излучения от 7 до 10 ГГц) для передачи электромагнитной волны от магнетрона в камеру токамака КТМ.

3. Разработана электрическая схема и проведено макетирование высоковольтного источника питания системы СВЧ-предыонизации. Получены экспериментальные результаты подтверждающие работоспособность высоковольтного источника питания.

4. Проведено подключение и настройка магнетрона к высоковольтному источнику питания с получением СВЧ-излучения: достигнуты режимы генерации магнетрона длительностью до 1.4 мс, импульсная мощность СВЧ-излучения полученная расчетным путем составляет 62660 Вт (при максимальном КПД магнетрона 40 %).

В результате проведенной работы разработана и собрана система СВЧ-предыонизации для физического пуска токамака КТМ на основе электронно-циклотронного резонанса в лабораторных условиях с получением СВЧ-излучения. Дальнейшая работа предполагает более точного определения мощности СВЧ-излучения с помощью ответвителя мощности и детектора, а также установку системы предыонизации непосредственно на камере токамака КТМ с получением экспериментальных данных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Беляков В.А., Кавин А.А., Лепихов С.А., Минеев А.Б., Овсянников А.Д. ТОКАМАК: начальная стадия разряда. СПб.: Издательство Лань, 2014 – с. 50-53.
2. Глухих В.А., Беляков В.А., Минеев А.Б. Физико-технические основы УТС. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2006.
3. M. Gryaznevich, V. Shevchenko and A. Sykes. Plasma formation in START and MAST spherical tokamaks. NUCLEAR FUSION 46 (S573–S583). Received 16 December 2005, accepted for publication 7 June 2006 Published 17 July 2006. Online at stacks.iop.org/NF/46/S573.
4. Y.S. Bae, J.H. Jeong<sup>1</sup>, S.I. Park<sup>1</sup>, M. Joung, J.H. Kim, S.H. Hahn, S.W. Yoon, H.L. Yang, W.C. Kim, Y.K. Oh, A.C. England, W. Namkung<sup>1</sup>, M.H. Cho<sup>1</sup>, G.L. Jackson<sup>2</sup>, J.S. Bak and the KSTAR team. ECH pre-ionization and assisted startup in the fully superconducting KSTAR tokamak using second harmonic. NUCLEAR FUSION 49 022001 (5pp). Received 13 August 2008, accepted for publication 27 November 2008 Published 19 December 2008. Online at stacks.iop.org/NF/49/022001.
5. Панин И.С., Панченко Л.В. Импульсные магнетроны. Москва: Издательство Советское радио, 1966 г.
6. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Устройства СВЧ и антенны / Под редакцией Д.И. Воскресенского. Изд.2-е, доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2006 – с. 35-41.
7. Сапунов Г.С. Ремонт микроволновых печей. Москва: СОЛОН-пресс, 2003 – с. 8-15.

#### ЭЛЕКТРОНДЫ-ЦИКЛОТРОНДЫ РЕЗОНАНС НЕГІЗІНДЕ КТМ ТОКАМАКТЫҢ ФИЗИКАЛЫҚ ІСКЕ ҚОСУ ҮШІН ИОНДАНДЫРУ АЛДЫ ЖҮЙЕСІ

Г.В. Шаповалов, Е.В. Тарасенко, А.Т. Кусаннов

ҚР ҰАО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Мақалада КТМ токамақтың физикалық іске қосуын қамтамасыз етуге, электрлік схемаларды жетілдіру және АЖЖ жүйесінің жоғары вольтті қоректендіру көзі – иондардыру алдын макеттеуге, магнетронды АЖЖ жүйесінің жоғары вольтті қоректендіру көзі – сәулелендіргішке қосу және реттеуге арналған есептеме зерттеулерінің нәтижесі берілген.

Резонансты АЖЖ – иондардыру алды жүйесі КТМ токамактың физикалық іске қосуында камераның берілген аумағындағы газдың берік «тесіп өтуін» және иондануын қамтамасыз етеді. Сондай-ақ, КТМ токамакта материалтанушылық зерттеулерінде және КТМ токамакта плазма физикасы бойынша зерттеулерде бұдан әрі қолданылатын, жоғары технологиялық ғылыми-зерттеулік қондырғылардағы тәжірибелік жұмыстардың ерекше іс-тәжірибесіне қол жеткізетін боламыз.

**SYSTEM OF PREIONISATION FOR PHYSICAL START-UP OF TOKAMAK KTM  
ON THE BASIS OF ELECTRON CYCLOTRON RESONANCE**

**G.V. Shapovalov, E.V. Tarasenko, A.T. Kusainov**

*Institute of Atomic Energy Branch of the RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

The article sets out results of computational studies to provide the physical start-up of KTM Tokamak, the development of electrical circuit and layout of high-voltage power supply source of microwave preionization system, connection and setting of the magnetron to a high voltage power supply to produce a microwave.

The system of resonant microwave preionization will provide reliable ionization and safe «sample» of of the gas in the predetermined area of chamber on the physical start-up of KTM Tokamak. There will also be acquired unique experience of experimental work on high-tech research and development installation, which will be used in further research on the physics of KTM tokamak plasma and in materials research at KTM tokamak.

УДК 621.039.5

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО АДАПТАЦИИ  
МЕТОДА k0-СТАНДАРТИЗАЦИИ ИНАА ДЛЯ РЕАКТОРА ИВГ.1М**

Медетбеков Б.С., Алейников Ю.В., Попов Ю.А.

*Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

В статье представлены результаты физических исследований, проведенных для адаптации метода k0-стандартизации инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) на реакторе ИВГ.1М. В качестве референсных материалов были выбраны стандартные образцы горных пород СГД и СТ-2А. Исследованы поля тепловых и резонансных нейтронов в экспериментальном канале реактора ИВГ.1М. Определено содержание элементов-аналитов в стандартных образцах горных пород методом k0-стандартизации, приведены отношения расчетных и аттестованных значений концентраций элементов. Рассчитана и выражена в виде Z-критерия оценка точности анализа для элементов-аналитов.

**ВВЕДЕНИЕ**

В сравнении с традиционно применяемым классическим нейтронно-активационным анализом полуабсолютный метод k0-стандартизации или метод k0-ИНАА имеет целый ряд преимуществ. Так, метод k0-стандартизации заслуживает особого внимания при серийном определении большого числа элементов в пробах, когда использование эталонов для анализа требует больших затрат труда и времени на различные подготовительные операции, измерение активности либо когда эталоны отсутствуют вообще.

При использовании метода k0-ИНАА для определения элементного состава образцов отпадает необходимость в многоэлементных стандартах, как этого требует классический относительный метод эталонов. Кроме того, этот метод обеспечивает воспроизводимость результатов анализов и точность на том же уровне, что и метод эталонов. Особенно метод предпочтителен, когда интенсивность активирующего излучения (поток нейтронов) в одной серии анализов меняется от одного облучения к другому. Даже с появлением самых передовых ядерно-физических методов анализа элементного состава различных материалов нейтронно-активационные методы анализа по-прежнему состоят в арсенале исследователей многих стран мира. Основные работы, связанные с применением метода k0-ИНАА, публикуются в ряде журналов, таких как *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, *Radiation Measurements* и *Applied Radiation and Isotopes* и др. [1–3].

В данной работе представлены результаты адаптации метода k0-ИНАА на исследовательском реакторе ИВГ.1М с использованием стандартных образцов горных пород.

**ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

Полуабсолютный метод k0-ИНАА требует предварительного знания некоторых характеристик поля нейтронов для определения эффективного поперечного сечения реакций ( $n$ ,  $\gamma$ ) на изотопах элементов-аналитов. Характеристики поля нейтронов в месте

облучения образцов в ФКЭ реактора ИВГ.1М определялись активационным методом с использованием АИ. Исследования проводились на пусках П-15-03 и П-15-04 реактора ИВГ.1М. Физические исследования включали в себя:

- подготовку АИ к облучению в реакторе;
- облучение АИ в реакторе;
- измерение гамма-спектра облученных АИ;
- измерение гамма-спектра образцовых источников и калибровку спектрометра;
- определение скорости реакции на изотопах АИ;
- расчет плотности потока тепловых нейтронов;
- расчет параметра поля надтепловых нейтронов  $\alpha$ , определяющего степень отличия формы спектра надтепловых нейтронов от идеального  $1/E$  спектра;
- расчет отношения плотности потока тепловых и надтепловых нейтронов  $f$ .

Для определения плотности потока нейтронов использовались наборы АИ, перекрывающих энергетический диапазон нейтронов от 1,6 эВ до 6200 эВ.

При определении плотности потока тепловых нейтронов использовались так называемые  $1/v$ -индикаторы, для которых микроскопическое сечение обратно пропорционально скорости нейтронов  $v$ , и скорость реакции независима от энергетического распределения [4].

При определении потока надтепловых нейтронов использовались индикаторы, спектральная чувствительность которых обусловлена наличием резонансной структуры энергетической зависимости поперечных сечений. Для снижения влияния тепловых нейтронов резонансные индикаторы облучались в кадмиевых экранах, которые избирательно поглощают тепловые нейтроны.

**Подготовка активационных индикаторов**

Предварительно были проведены работы по подготовке АИ для определения характеристик поля

нейтронов в местах облучения образцов [5]. Для облучения в реакторе ИВГ.1М в серии пусков были подготовлены АИ из следующих металлов: золото, марганец, индий, тантал, цирконий, медь, лютеций.

В результате проведенных работ по подготовке АИ все образцы в виде порошка и металлических фольг взвешены, упакованы в соответствующие контейнеры и промаркированы.

#### Физические исследования

Целью физических исследований являлось определение плотности потока тепловых нейтронов и спектральных характеристик поля надтепловых нейтронов в ФКЭ реактора ИВГ.1М активационным методом с использованием активационных индикаторов (АИ).

Исследования проводились на пусках реактора ИВГ.1М П-15-03 и П-15-04.

Физические исследования включали в себя:

- подготовку АИ к облучению в реакторе;
- облучение АИ в реакторе;
- измерение гамма-спектра облученных АИ;
- измерение гамма-спектра образцовых источников и калибровку спектрометра;
- определение скорости реакции на изотопах АИ;
- расчет плотности потока тепловых нейтронов;

– расчет параметра поля надтепловых нейтронов  $\alpha$ , определяющего степень отличия формы спектра надтепловых нейтронов от идеального  $1/E$  спектра;

– расчет отношения плотности потока тепловых и надтепловых нейтронов  $f$ .

Эксперименты проводились с использованием облучательного устройства (ОУ) (чертеж АК 21261.00.000СБ), в которое помещались АИ. В качестве АИ использовались следующие материалы: индий, золото, марганец, медь, тантал, цезий, цирконий, лютеций, рутений.

#### Результаты исследования по определению характеристик поля нейтронов

Облучение АИ было проведено на пусках П-15-03 и П-15-04 реактора ИВГ.1М. Облучение проводилось на мощности 10 кВт в течение 1070 с.

В таблице 11 приведены результаты определения скорости реакций и эффективной плотности потока тепловых нейтронов для АИ из золота, меди и марганца.

В таблице 2 приведены результаты определения скорости реакций для открытого АИ ( $R_{bare}$ ) и АИ, помещенного в кадмиевый фильтр ( $R_{Cd}$ ), а также значения плотности потока промежуточных нейтронов.



Рисунок 1. Активационные индикаторы для определения характеристик поля нейтронов

Таблица 1. Значения скорости реакций ( $R$ ,  $RCd$ ) и эффективной плотности потока тепловых нейтронов ( $\Phi_{th}$ ) для АИ из золота, меди и марганца

АИ	$R$ , с <sup>-1</sup>		$RCd$ , с <sup>-1</sup>		$\Phi_{th}$ , нейтр/(см <sup>2</sup> ·с)	
	П-15-03	П-15-04	П-15-03	П-15-04	П-15-03	П-15-04
Золото	$2,47 \cdot 10^{-11}$	$2,44 \cdot 10^{-11}$	$6,60 \cdot 10^{-12}$	$6,58 \cdot 10^{-12}$	$1,84 \cdot 10^{11}$	$1,80 \cdot 10^{11}$
Медь	$8,06 \cdot 10^{-13}$	$7,98 \cdot 10^{-13}$	$2,04 \cdot 10^{-14}$	$2,04 \cdot 10^{-14}$	$1,83 \cdot 10^{11}$	$1,82 \cdot 10^{11}$
Марганец	$2,53 \cdot 10^{-12}$	$2,47 \cdot 10^{-12}$	$6,11 \cdot 10^{-14}$	$6,14 \cdot 10^{-14}$	$1,87 \cdot 10^{11}$	$1,81 \cdot 10^{11}$

Таблица 2. Значения скорости реакций ( $R_{bare}$ ,  $RCd$ ) для АИ и плотности потока промежуточных нейтронов на единицу летаргии  $\Phi_e$

АИ	Энергия резонанса $E_0$ , эВ	$R_{bare}$ , с <sup>-1</sup>	$RCd$ , с <sup>-1</sup>	$\Phi_e$ , нейтр/(см <sup>2</sup> ·с)
Индий	1,6	$3,95 \cdot 10^{-11}$	$1,15 \cdot 10^{-11}$	$4,89 \cdot 10^9$
Золото	4,9	$2,47 \cdot 10^{-11}$	$6,60 \cdot 10^{-12}$	$4,82 \cdot 10^9$
Тантал	10,0	$5,88 \cdot 10^{-12}$	$2,60 \cdot 10^{-12}$	$4,80 \cdot 10^9$
Марганец	468,0	$2,53 \cdot 10^{-12}$	$6,11 \cdot 10^{-14}$	$4,61 \cdot 10^9$
цирконий	338,0	$2,02 \cdot 10^{-14}$	$1,94 \cdot 10^{-14}$	$3,73 \cdot 10^9$
Медь	1000,0	$8,06 \cdot 10^{-13}$	$2,04 \cdot 10^{-14}$	$4,46 \cdot 10^9$
Цирконий $^{94}Zr(n,\gamma)^{95}Zr$	6800,0	$1,1 \cdot 10^{-14}$	$1,23 \cdot 10^{-15}$	$4,65 \cdot 10^9$

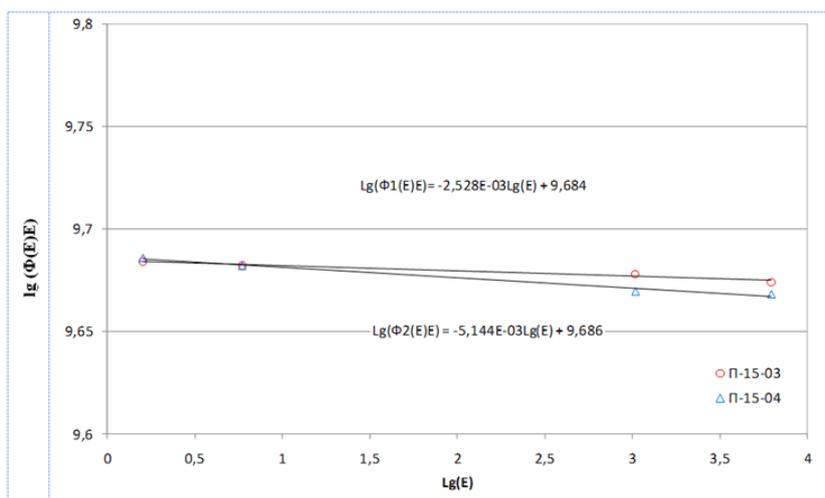


Рисунок 2. Зависимость  $Lg(\varphi(E)E)$  от  $Lg(E)$  (мощность реактора 10 кВт)

Параметр  $\alpha$  определен по четырем АИ (индий, золото, марганец и медь) [6]. Определение  $\alpha$  для двух экспериментов представлено на рисунке 2 в виде зависимости  $Lg(\varphi(E)E)$  от  $Lg(E)$ . Среднее значение  $\alpha$  составило 0,0038.

Параметр  $f$  определен с помощью АИ из индия, золота и тантала, для которых эффективная энергия резонанса составляет менее 10 эВ и которые имеют, соответственно, минимальную поправку, учитывающую активацию АИ в «неидеальном» надтепловом спектре [6]. Результаты определения параметра  $f$  представлены в таблице 3.

Таблица 3. Значения параметра  $f$ , определенные по АИ из индия, золота и тантала

Пуск реактора	Значение параметра $f$		
	Индий	Золото	Тантал
П-15-03	42	42	43
П-15-04	41	40	41

### Апробация метода k0-ИНАА на реакторе ИВГ.1М

Стандартные образцы (СО), которые были использованы для исследований, не требуют специальной подготовки. Подготовка образцов заключалась в расфасовке и взвешивании образцов в соответствии с [7].

Для облучения были подготовлены следующие образцы:

- стандартный образец горной породы СТ-2А;
- стандартный образец горной породы СГД-2;
- активационный золотосодержащий индикатор.

Внешний вид СО и золотосодержащего компаратора представлен на рисунке 3.

Физические исследования со стандартными образцами проб горных пород были проведены на пусках П-15-06 и П-15-07 реактора ИВГ.1М. Средняя мощность реактора на каждом из пусков составила 0,3 МВт, среднее время облучения составило 4060 с.

Целью физических исследований являлось получение экспериментальных данных по активации элементов-аналитов в образцах стандартных образцов проб горных пород, облученных в ФКЭ реактора ИВГ.1М, исследование условий выдержки и измерения образцов.

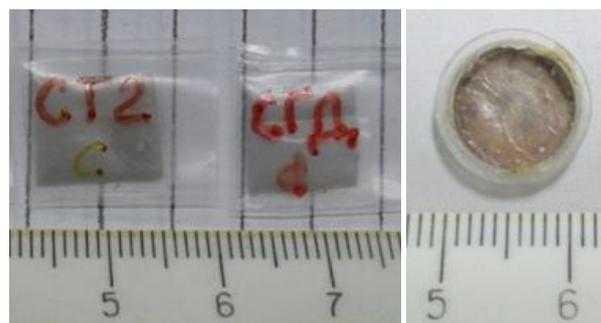


Рисунок 3. Стандартные образцы горных пород и активационный золотосодержащий индикатор

Физические исследования включали в себя:

- проведение реакторного эксперимента с ОУ, оснащенным образцами проб;
- постреакторные исследования, включающие гамма-спектрометрические измерения спектров от облученных образцов проб с последующей обработкой результатов измерений.

Масса образцов приведена в таблице 4.

Таблица 4. Масса образцов

Условное обозначение	Масса, мг
СТ-2	56,4
СГД-2	63,7

Измерение спектров гамма-излучения образцов проводилось на многоканальном спектрометре с полупроводниковыми детекторами из особо чистого германия CANBERRA GL-0515R (Д1) и CANBERRA GL-0515R (Д2).



Рисунок 4. Гамма-спектрометрический комплекс

Измерения образцов проводились через 20 мин и более, а также 1; 2; 3; 6; 7; 8; 9; 30 сут после окончания облучения. Время экспозиции составило от 600 с до 85000 с.

#### Определение концентрации элементов в СО методом k0-ИНАА

Целью расчета является определение концентрации элементов-аналитов в СО методом k0-ИНАА после их облучения на пусках П-15-06 и П-15-07 реактора ИВГ.1М и сравнение расчетных и аттестованных значений концентраций для контроля погрешности определения.

При проведении расчета решались следующие задачи:

- обработка экспериментальных данных спектров гамма-излучения образцов;
- определение концентрации элемента-аналита в анализируемом образце;
- определение относительной погрешности концентрации элемента-аналита в образце.
- оценка точности результатов

Порядок расчета содержания элементов в образцах

Концентрация элемента-аналита в анализируемом образце определялась в соответствии с основным уравнением [8]

$$C_a = \frac{\left( \frac{N_p/t_c}{SDCW} \right)_a \cdot \frac{1}{k_{0,a}} \cdot \frac{1 + \theta_{0,m}(\alpha)/f}{1 + \theta_{0,a}(\alpha)/f} \cdot \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_a}}{\left( \frac{N_p/t_c}{SDCW} \right)_m}, \quad (1)$$

где символы  $a$  и  $m$  относятся к элементу-аналиту в образце и монитору соответственно;  
 $C_a$  – концентрации элемента-аналита в образце, мкг/г;  
 $N_p$  – площадь пика полного поглощения (ППП), имп.;  
 $t_c$  – время экспозиции, с;  
 $S = 1 - \exp(-\lambda t_{ir})$  – поправка, учитывающая насыщение за время облучения, отн. ед.;

$\lambda$  – постоянная распада радиоактивного изотопа элемента-аналита,  $s^{-1}$ ;

$t_{ir}$  – время облучения, с;

$D = \exp(\lambda t_{cool})$  – поправка, учитывающая распад радиоактивного изотопа элемента-аналита за время «охлаждения», отн. ед.;

$t_{cool}$  – время охлаждения, с;

$C = \frac{\lambda t_c}{1 - \exp(-\lambda t_c)}$  – поправка, учитывающая

распад радиоактивного изотопа элемента-аналита за время измерения, отн. ед.;

$W$  – масса образца (монитора), г;

$k_{0m}$  – экспериментально определенные константы для монитора и элемента-аналита (для золота  $k_{0m} = 1$ ) [9];

$\theta_{0,m}$ ,  $\theta_{0,a}$  – физические константы, определяющие отношение сечений для эпитепловых и тепловых нейтронов для монитора и аналита соответственно (Приложение А) [9];

$f$  – отношение потоков тепловых и эпитепловых нейтронов в местах облучения, отн. ед. (для ИВГ.1М,  $f = 40$ ) [6];

$\varepsilon_m$ ,  $\varepsilon_a$  – эффективность регистрации гамма-квантов радиоактивных изотопов монитора и элемента-аналита, отн. ед.

Значение  $\theta_0(\alpha)$  определяется как отношение резонансного интеграла к поперечному сечению реакции на тепловых нейтронах при скорости нейтронов  $2200 \text{ м с}^{-1}$  и может быть вычислено из  $\theta_0$ , если известны коэффициент  $\alpha$  и эффективная резонансная энергия. Значения ядерных константы  $E_r$  и  $\theta_0$  приведены в специальной литературе и применимы ко всем практическим условиям облучения.

Отношение  $C_{rel}$  концентрации элемента в образце, определенной методом k0-ИНАА, к аттестованному значению концентрации определяется по формуле

$$C_{rel} = C_{exp}/C_{att}, \quad (2)$$

где  $C_{exp}$  – концентрация элемента в образце, определенная методом k0-ИНАА;

$C_{att}$  – аттестованное значение концентрации элемента в образце [10, 11].

#### Анализ и расчет погрешности методом k0-ИНАА

Стандартные образцы горных пород СТ-2, СГД-2 и золотосодержащий компаратор были облучены на двух пусках реактора ИВГ.1М. Контейнер с образцами находился на уровне центра активной зоны реактора. После облучения образцы были извлечены из ФКЭ реактора ИВГ.1М для проведения гамма-спектрометрических измерений. Измерение спектров гамма-излучения образцов проводилось на многоканальном спектрометре с полупроводниковым детектором из особо чистого германия.

Расчет относительной погрешности определения концентрации элемента-аналита в образце  $\delta(C_a)$  про-

водится в соответствии с [12, 13]. Основными принципами методики расчета погрешности, приведенной в [12] являются:

1) полная погрешность результата измерений определяется как сумма случайной и систематической погрешностей, приведенных к одинаковой доверительной вероятности  $p = 0,68$ ;

2) закон распределения составляющих случайной погрешности результата принимается нормальный;

3) закона распределения составляющих систематической погрешности принимается равномерным.

Полная погрешность результата рассчитывается исходя из погрешности множителей из правой части уравнения (1).

$$\delta C = \sqrt{\sum_k S_k^2} + 1,1 \sqrt{\sum_k \theta_k^2}, \quad (3)$$

где  $k$  указывает множитель;

$S_k$  – случайная относительная погрешность множителя при доверительной вероятности 0,95;

$\theta_k$  – систематическая погрешность (максимальная граница).

Анализ составляющих погрешности определения концентрации в образце аналита  $\delta C_a$ .

Полная погрешность  $\delta(C_a)$  при определении концентрации аналита методом k0-ИНАА обусловлена погрешностями, связанными с определением следующих величин:

$N_p$  – площадь ППП гамма-излучения аналита и компаратора,  $\delta(N_p)_{a,m}$ ;

$W_{s,m}$  – масса анализируемого образца и компаратора,  $\delta(W)_{a,m}$ ;

$D_{s,m}$  – поправочный коэффициент на распад за время выдержки,  $\delta(D)_{a,m}$ ;

$C_{s,m}$  – поправочный коэффициент на распад за время измерения,  $\delta(C)_{a,m}$ ;

$S_{a,m}$  – поправка, учитывающая насыщение активности изотопа элемента-аналита,  $\delta(S)_{a,m}$ ;

$k_0$  – ядерно-физическая константа, [9];

$\varepsilon$  – эффективность регистрации гамма-квантов,  $\delta(\varepsilon)_{a,m}$ ;

$1+Q(\alpha)/f$  – множитель, численно равный отношению эффективного и поперечного сечения реакции  $(n, \gamma) \sigma_{эфф} / \sigma_0$ .

#### Оценка точности результата анализа

Точность результата анализа, проведенного методом ИНАА, в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ [14], оценена путем сравнения результата количественного анализа СО с аттестованными значениями, приведенными в сертификатах. Оценка точности анализа выражается в виде критерия «Z», представляющего собой разность полученного результата и аттестованного значения с учетом неопределенности полученного результата и абсолютной погрешности аттестованного значения, приведенного в сертификате. Критерий Z рассчитывается в соответствии с выражением [14]

$$Z_i = \frac{C_i - C_{ref,i}}{\sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_{ref,i}^2}}, \quad (4)$$

где  $C_i$ ,  $\sigma_i$  – полученные расчетные значения концентрации и их погрешности;

$C_{ref,i}$ ,  $\sigma_{ref,i}$  – сертифицированные значения концентрации элементов и их погрешности соответственно.

В случае если  $Z < 2$ , результат анализа считается приемлемым. Если  $2 < Z < 3$  то результат анализа можно рассматривать как «ориентировочный» и если  $Z > 3$  то результат считается не приемлемым [14]. На рисунке 5 суммированы результаты точности количественного анализа для СО.

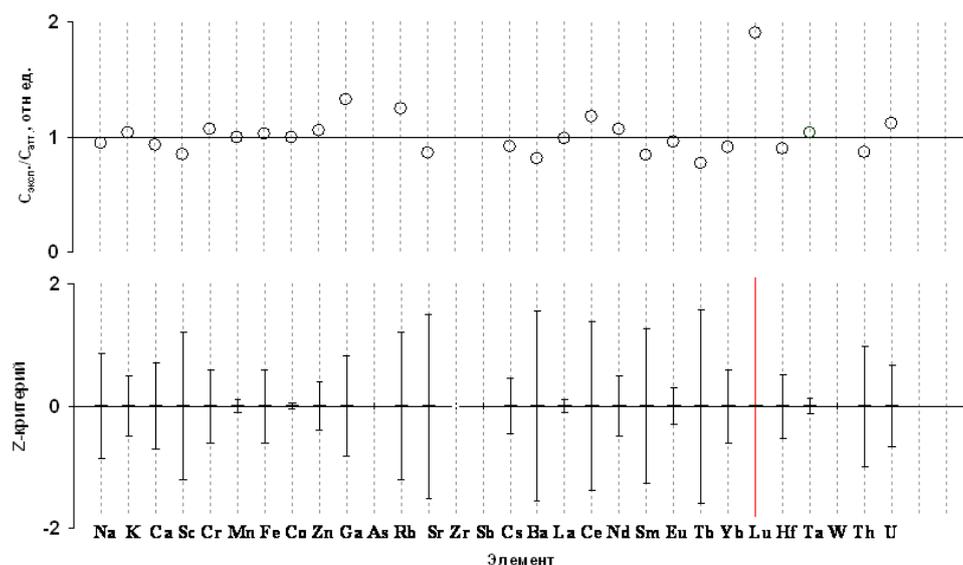


Рисунок 5. Результаты расчета отношения  $C_{эксп.}/C_{атт}$  и критерия Z для СО СГД

### Результаты

В таблице 5 представлены результаты расчета концентрации элементов-аналитов и соответствующие им погрешности, сертифицированные значения концентраций для элементов-аналитов и результаты расчета Z-критерия для СО СГД. Как видно из таблиц, результаты анализа для идентифицированных элементов (кроме лютеция) можно считать приемлемыми. В качестве иллюстрации ниже в графическом виде приведены результаты расчета Z-критерия и отношение значений концентрации элементов в СО СГД, полученные расчетно-экспериментальным путем, к паспортным значениям.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ и расчет погрешности полуабсолютного метода k0-ИНАА при определении концентрации элементов-аналитов в СО СТ-2, СГД-4. Точность определения концентрации элементов в СО была оценена с помощью Z-критерия. Показано, что для большинства аналитических результатов значение Z-критерия находится в пределах от 0 до 2. Таким образом, результаты элементного анализа, полученные полуабсолютным методом, показали хорошее согласие между расчетными и аттестованными значениями концентрации элементов-аналитов. Полученные удовлетворительные результаты элементного анализа СО, проведенного методом k0-ИНАА, можно считать доказательством адаптации методики k0-ИНАА на реакторе ИВГ.1М.

В данной работе показано, что использование полуабсолютного метода анализа k0-ИНАА может быть успешно реализовано с необходимой точностью на реакторе ИВГ.1М. Внедрение этого метода позволит преодолеть некоторые недостатки относительного метода ИНАА. Метод k0-ИНАА может быть жизнеспособным аналитическим инструментом для реактора со стабильным и хорошо термализованным потоком нейтронов, каким является реактор ИВГ.1М. Метод k0-ИНАА является экономически эффективным аналитическим методом как для различных отраслей промышленности, так и для научных исследований, особенно при определении микроконцентрации элемента в образцах.

*Таблица 5. Результаты расчета концентрации элементов-аналитов и Z-критерия для СО СГД*

Элемент	Catt	ΔCatt	Cexp	ΔCexp	Cexp/Catt	Z
<b>Время выдержки образцов 1 сут</b>						
Ga	17	2	22,6	6,5	1,33	0,82
K'	2,56	0,09	2,67	0,19	1,04	0,52
Na'	2,02	0,05	1,93	0,094	0,95	0,85
<b>Время выдержки образцов от 5 сут до 10 сут</b>						
As	НА	НА	<ПО	-	-	НО
Au''	0,004		<ПО	-	-	НО
Ba	1520	150	1240	100	0,813	1,55
Br	НА	НА	<ПО	-	-	НО
Ca'	7,64	0,1	7,13	0,7	0,933	0,72
Ho	1,1	0,2	1,13	0,27	1,03	0,09
La	82	10	81,2	4,1	0,99	0,07
Lu	0,3	0,05	0,57	0,04	1,91	4,22
Nd	89	11	95	4,5	1,05	0,50
Rb	80	10	100	13	1,25	1,22
Sm	17	2	14,3	0,74	0,844	1,27
U	1,8	0,3	2,02	0,14	1,12	0,66
W	НА	НА	<ПО	-	-	НО
Yb	2,5	0,3	2,28	0,17	0,912	0,64
<b>Время выдержки образцов до 30 сут</b>						
Eu	3,9	0,5	3,74	0,2	0,96	0,30
Ce	163	20	193	8,8	1,18	1,37
Co	40	4	40	2,1	1	0,00
Cr	58	5	61,8	3,6	1,07	0,62
Cs	3,3	0,5	3,03	0,34	0,919	0,45
Fe'	7,93	0,08	8,18	0,4	1,03	0,61
Hf	5,3	0,9	4,8	0,32	0,9	0,52
Sb	НА	НА	<ПО	-	-	НО
Sc	26	3	22,1	1,1	0,85	1,22
Se	НА	НА	<ПО	-	-	НО
Sr	2240	140	1930	150	0,863	1,51
Ta	0,5	0,1	0,518	0,1	1,04	0,13
Tb	1,5	0,2	1,16	0,08	0,773	1,58
Th	8	1	6,95	0,39	0,869	0,98
Zn	120	15	127	10	1,06	0,39
Zr	219		<ПО	-	-	НО

\*Концентрация в %.  
НА – не аттестован.

<ПО – меньше предела обнаружения.  
НО – не обнаружен.

### ЛИТЕРАТУРА

- De Corte F. The standardization of standardless NAA. // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2001. – V. 248. – № 1. – P. 13–20.
- Instrumental neutron activation analyses of uranium and thorium in samples from tin mining and processing sites / F.S. Olise, O.F. Oladejo, S.M. Almeida, O.K. Owoade, H.B. Olaniyia, M.C. Freitas // Journal of Geochemical Exploration. – 2014. – V. 142. – P. 36–42.
- Experimental k0 and k0-fission factors for the determination of the n(235U)/n(238U) enrichment levels and correction for 235U fission interferences in samples containing uranium / F. Arbocco'F., P. Vermaercke, K. Smits, L. Sneyers, K. Strijckmans // J Radioanal Nucl Chem. – 2014. – V. 302. – P. 721–735.
- Экспериментальные исследования полей нейтронов и гамма-излучений / Под ред. Ю.А. Егорова. – М.: Атомиздат, 1974.
- Подготовка образцов материалов ядерной техники: акт от 04.09.2015 №13-240-02/1139вн. / филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК. – Курчатов, 2015. – 2 с.

6. Физические исследования с применением активационных индикаторов, облученных на пусках П-15-03 и П-15-04 реактора ИВГ.1М: протокол от 23.06.2015 № 13-240-02/800 / филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК. – Курчатов, 2015. – 10 с.
7. Методические указания по подготовке проб минерального сырья для инструментального нейтронно-активационного анализа: инструкция / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК. – Курчатов, 2012. – 10 с.– Инв. № К-50993.
8. Single-comparator methods in reactor neutron activation analysis / A. Simonits, F. De Corte, J. Hoste // J. Radioanal. Chem. – 1975. – Vol. 24. – P. 31.
9.  $k_0$ -Measurements and related nuclear data compilation for (n,  $\gamma$ ) reactor neutron activation analysis / F. De Corte, A. Simonits // J. Radioanal. Nucl. Chem. – 1989. – Vol. 133 – P. 43.
10. Стандартный образец горной породы «Трапп»: паспорт: ГСО 8671-2005. – Иркутск, 2012.
11. Стандартный образец горной породы «Габбро эссекситовое»: паспорт: ГСО 8670-2005. – Иркутск, 2012.
12. Внутриреакторная дозиметрия: практическое руководство / Б.А. Брискман, В.В. Генералов, Е.А. Крамер-Агеев, В.С. Трошин. – М.: Энергоиздат, 1985.
13. Метрология нейтронных измерений на ядерно-физических установках. Том 1, 2 / под редакцией Р.Д. Васильева // Материалы I Всесоюзной школы. – М., 1976. – С. 176.
14. Quality aspects of research reactor operations for instrumental neutron activation analysis / Report of an Advisory Group meeting held in Accra, Ghana, 18 – 22 October 1999. – IAEA-TECDOC-1218. – 2001.

### ИВГ.1М РЕАКТОРЫНА АРНАЛҒАН ИНАТ k0-СТАНДАРТТАУ ӘДІСІН БЕЙІМДЕУ БОЙЫНША ТӘЖІРИБЕЛІК ЗЕРТТЕУ

Б.С. Медетбеков, Ю.В. Алейников, Ю.А. Попов

*ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан*

Мақалада ИВГ.1М реакторында инструменталды нейтронды-активациялық талдаудың (ИНАТ) k0-стандарттау әдісін бейімдеу бойынша физикалық зерттеу нәтижесі ұсынылған. Референсиялық материалдар ретінде СТ-2А және СГД тау жыныстарының стандартты үлгілері таңдап алынды. ИВГ.1М реакторында жылулық және резонанстық нейтрондардың өрісі зерттелді. k0-стандарттау әдісімен тау жынысының стандартты үлгілеріндегі элементтер-аналиттердің болуы анықталды, элементтер концентрациясының есептік және аттестатталған мағынасының қатынастары келтірілді. Талдау дәлдігінің бағасы Z-критерий түрінде көрсетілді және элементтер-аналиттер үшін есептелінді.

### EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS FOR ADAPTATION OF k0-STANDARTIZATION INAA METHOD FOR IVG.1M REACTOR

B.S. Medetbekov, Y.V. Aleynikov, Y.A. Popov

*Institute of Atomic Energy Branch of the RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

The article addresses results of physical research for adaptation of comparator method k0-standardization of instrumental neutron activation analysis (k0-INAA) in IVG.1M reactor. SGD and ST-2A-type standard rock samples were used as reference materials. Fields of thermal and resonance neutrons were investigated in IVG.1M experimental channel. There were determined the concentration of analyte-elements in standard rock sample by k0-INAA method. Also, the ratios between the calculated and certified values of element concentrations are presented. The accuracy of analysis is expressed as Z-criterion and evaluated for analyte-elements.

УДК 621.039

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОТОТИПА КОРИУМА С КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛЬЮ SUS304 ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ НА АЭС

Скаков М.К., Бакланов В.В., Коянбаев Е.Т., Зуев В.А., Сапатаев Е.Е., Миниязов А.Ж., Кукушкин И.М., Кожаметов Е.А.

*Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

Представленная работа содержит результаты, полученные в процессе решения задачи по исследованию свойств затвердевшего расплава материалов активной зоны (кориум) легководного реактора при тяжелых авариях, в частности в работе описываются результаты взаимодействия кориума с конструкционной сталью SUS304 и проводится анализ полученных данных. В результате проведенной работы изучена микроструктура и определены элементный состав затвердевшего прототипа кориума и изучен характер взаимодействия кориума с конструкционной сталью реактора марки SUS304 в условиях моделирования тяжелой аварии на АЭС.

### ВВЕДЕНИЕ

При аварии на АЭС Фукусима-1 ядерное топливо было расплавлено из-за прекращения функционирования всех систем охлаждения реактора. Образовавшийся в результате аварии кориум перемещался и мог затвердевать в различных областях реакторной установки. Одной из задач, которую необходимо решить для ликвидации последствий этой аварии, является удаление затвердевшего кориума из корпуса реактора и контаймента АЭС. Основной проблемой при решении этой задачи является отсутствие достоверных данных о состоянии и свойствах затвердевшего кориума [1], что затрудняет разработку и создание инструментов для его удаления. Известно, что при тяжелой аварии в нижнем плenumе реактора формируется расплав активной зоны, который со временем затвердевает и в конечном итоге потребуется выполнить процедуру по его извлечению. Для подготовки технологии извлечения одним из актуальных вопросов будет вопрос о физико-механических свойствах кориума и поврежденных им конструкционных материалов, определяющих, в конечном счете, выбор инструмента для резки затвердевшей активной зоны аварийного реактора. С целью выявления характера взаимодействия кориума с конструкционными материалами, а также изучения состава и свойств типичных продуктов этого взаимодействия были проведены экспериментальные исследования.

Проведенные исследования позволяют изучить свойства затвердевших фрагментов модельного расплава активной зоны реакторов АЭС Фукусима-1 и получить данные, необходимые для создания конструкций механизмов по переработке реальных затвердевших фрагментов расплава активной зоны аварийных реакторов АЭС Фукусима-1. С этой целью были проведены экспериментальные исследования на установке для крупномасштабных экспериментов Лава-Б на базе Института атомной энергии.

### 1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ КРУПНОМАСШТАБНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Моделирование тяжелой аварии на АЭС проведено на стенде для крупномасштабных экспериментов «Лава-Б». Для этого необходимо было получить прототип кориума - расплав активной зоны и обеспечить взаимодействие с конструкционными материалами ядерного реактора.

Для получения расплава установка Лава-Б оснащена электрической плавильной печью (ЭПП) индукционного типа. ЭПП предназначена для плавления шихты различных композиций, состоящих из тугоплавких материалов. Слив расплава производится в устройство приема расплава (УПР) в экспериментальной секции установки. УПР изготовлен из немагнитной нержавеющей стали и представляет собой цилиндрический сосуд. В донной части УПР были установлены экспериментальные пластины из конструкционных реакторных сталей.

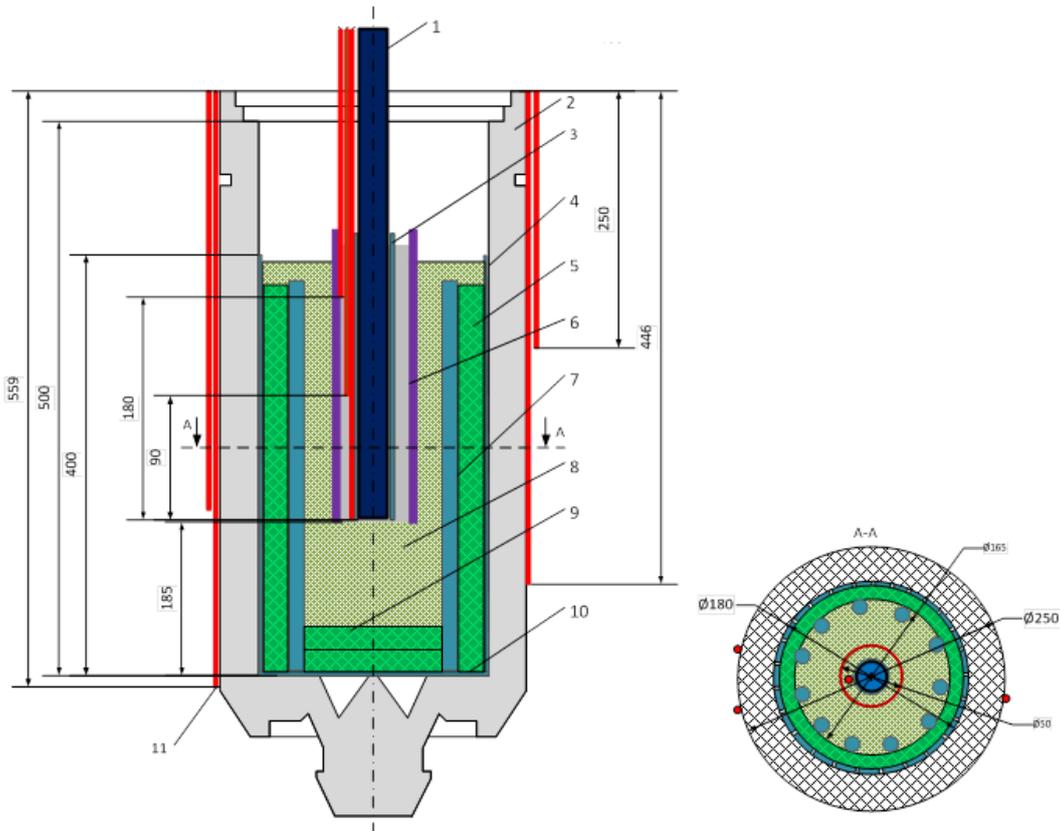
Целью эксперимента являлось получение расплава шихты состоящей из диоксида урана, карбида бора и циркония путем нагрева его до температуры 2400 – 2450 °С и слив расплава в УПР с установленными в ней металлическими пластинами конструкционных материалов ядерного реактора.

#### 1.1 Подготовка тигля

В процессе подготовка эксперимента в тигель ЭПП была загружена шихта, которая состояла из 42.9 кг диоксида урана, 0.4 кг карбида бора и 16.7 кг металлического циркония. Общая масса шихты составила 60.0 кг. На рисунке 1 представлена схема загрузки шихты в тигель ЭПП.

#### 1.2 Подготовка ловушки

При подготовке УПР в ловушку расплава устанавливаются образцы конструкционных материалов ядерного реактора в виде пластин из никелевого сплава 600 и сталей марок SUS304, SQV 2A и SUS316L. Внешний вид исследуемых пластин, изготовленной из стали марки SUS304 толщиной 20 мм, и общий вид УПР с установленными и закрепленными



1 – термовэл; 2 – тигель; 3 – циркониевая пластина длиной 200 мм; 4 – циркониевая пластина длиной 400 мм; 5 – таблетки  $UO_2$ ; 6 – картонный цилиндр; 7 – циркониевые стержни; 8 – смесь  $UO_2+Zr+V_4C$ ; 9 – смесь  $UO_2+Zr$ ; 10 – циркониевый диск; 11 – W/Re термопары

Рисунок 1. Схема загрузки шихты в тигель ЭПП



Рисунок 2. Общий вид дна ловушки расплава до эксперимента, с установленными и закрепленными пластинами

ми пластинами показан на рисунке 2. В центральной части образцы были зафиксированы кольцом из стальной проволоки с диаметром 5 мм.

После завершения подготовки экспериментальной секции с ловушкой расплава и электроплавильной печи были выполнены операции по их монтажу

на установку Лава-Б и подключению к установке технологических систем стенда.

Конечный результат данного экспериментальных исследований позволит прогнозировать некоторые свойства затвердевших материалов и анализировать различные сценарии взаимодействия конструкционных сталей с расплавом активной зоны реактора.

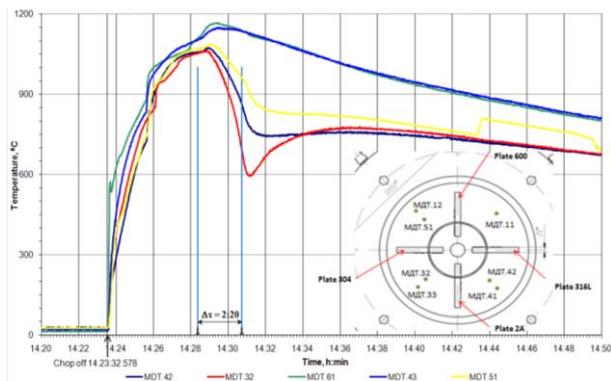
## 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

### 2.1 Данные температурных изменений во время эксперимента

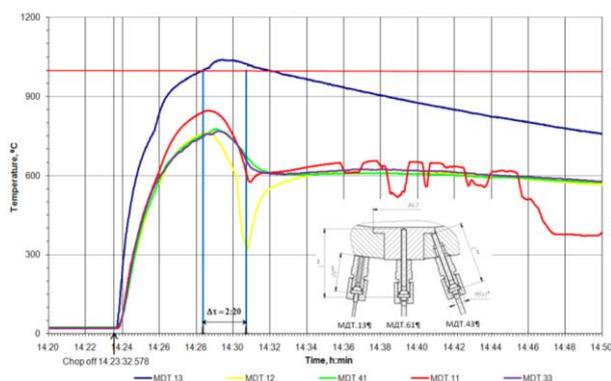
Для измерения температуры были установлены термопары на саму ловушку расплава и в пластинах.

Показания термопар, установленных в теле ловушки на расстоянии 1 мм от расплава и на внешней поверхности стальной ловушки, приведены на графиках (рисунок 3).

Максимальное значение температуры, зафиксированное термопарой МДТ.61, составило  $1165\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рисунок 3а). При достижении температуры на внешней поверхности ловушки значения  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  (к.т. МДТ.13) была включена подача воды на охлаждение ловушки. Через 2 минуты 20 секунд, после снижения температуры до  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ , подачу воды прекратили. Вода на охлаждение стальной ловушки расплава подавалась с расходом  $0.1\text{ кг/с}$ .



а) показания термопар, установленных в теле ловушки на расстоянии 1 мм от расплава



б) показания термопар, установленных на внешней поверхности стальной ловушки

Рисунок 3. Изменение показаний термопар

Температура материала ловушки на наружной поверхности (к.т. МДТ.13) не превысила значения 1040 °С.

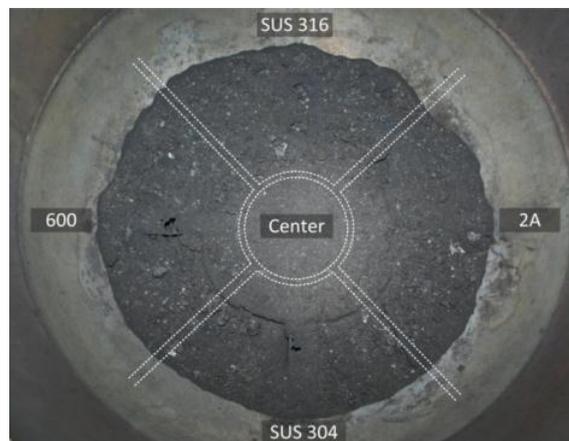
Анализ значений температуры, зафиксированных термопарами, установленными в пластине, изготовленных из образцов конструкционных материалов ядерного реактора, показывает, что значения температуры превысили температуру плавления стали. Из этого можно сделать заключение, что в местах установки термопар пластины расплавились. Это подтвердилось во время извлечения расплава из ловушки.

## 2.2 Состояние затвердевшего расплава с пластинами сталей после эксперимента

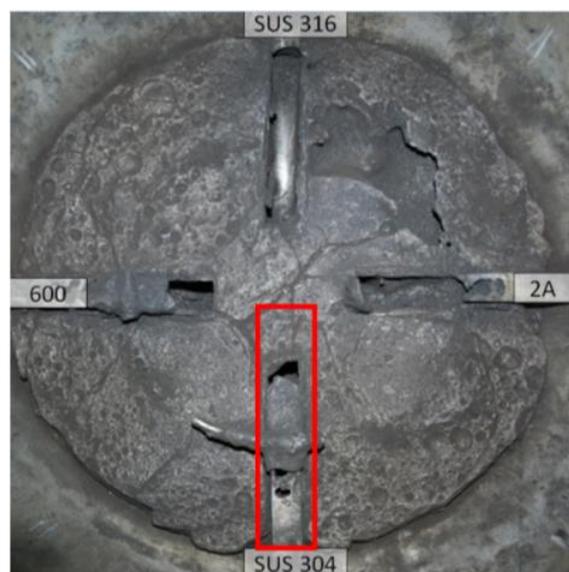
Внешний вид расплава кориума и состояние пластин после извлечения его рыхлой части представлен на рисунке 4, где хорошо видно, что основная часть всех пластин по окончании эксперимента полностью расплавлена. На месте их расположения сформировались пустоты, сохранившие начальную форму пластин.

На поверхности затвердевшего кориума заметны различного размера «кратеры», сформированные в результате газовыделения из жидкого расплава (рисунок 4б). На поверхности пластины SUS304 присутствует корка затвердевшего кориума. Также при-

сутствует корка от удерживающего кольца, а материал кольца был полностью расплавлен. В центральной части слитка сформировались трещины, соединяющие торцы пластин. Между слитком и стенкой ловушки образовался зазор.



а) общий вид слитка расплава в ловушке



б) расплав после извлечения рыхлого материала

Рисунок 4. Внешний вид ловушки с расплавом после эксперимента

Для определения уровня расположения пластины после ее расплавления и растекания по различным несплошностям (трещины, зазоры и т.п.) было проведено измерение высоты финального уровня пластины и построен профиль по направлению: SUS 304→SUS316L (рисунок 5). Измерение высоты осуществлялось путем измерения глубины вдоль опорной линии (верхний уровень исходного расположения пластин) с помощью штангенциркуля ШЦ-150-0.1 с шагом 5 мм. Ориентировочный объем остатка пластины нержавеющей стали SUS304 после расплавления и растекания составляет около 35% от исходного объема.

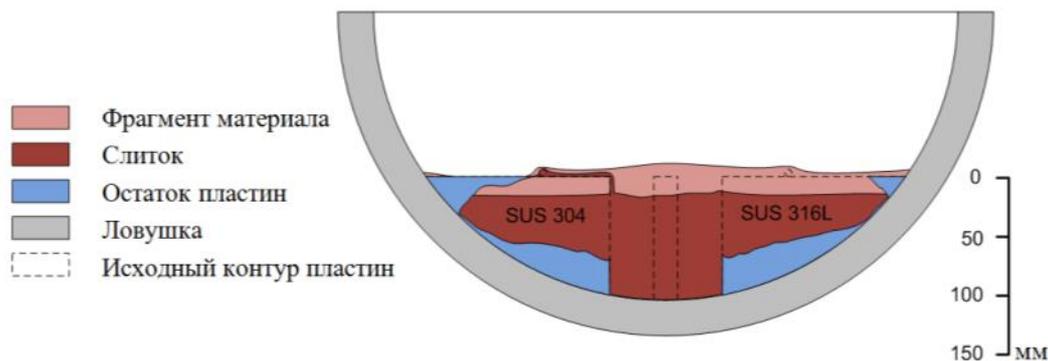


Рисунок 5. Модели сечения ловушки по направлению SUS304-SUS316L

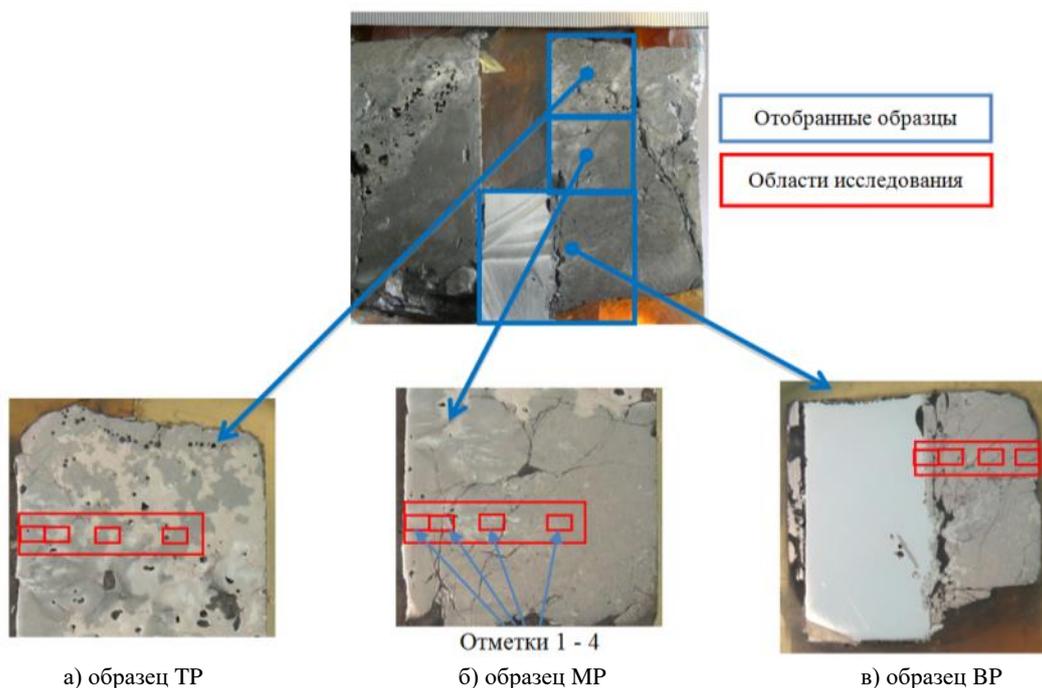


Рисунок 6. Внешний вид поперечного сечения зоны взаимодействия и выбранных частей по высоте пластины SUS304 с указанием исследуемых зон

### 3 ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### 3.1 Выбор и подготовка исследуемого объекта

После извлечения и визуального осмотра слитка с пластинами, который при извлечении разделился на две половины, были определены характерные сечения, на которых отобраны образцы для дальнейших исследований.

Для предотвращения развития трещин в слитке и удобства его фиксации, перед разделкой слитки были залиты в компаунд эпоксидной смолы. Были выполнены резы для отбора исследовательских образцов. Сечение слитка с исследуемой пластиной SUS304 после выполнения основных резов представлено на рисунке 6. Для того, чтобы изучить характер взаимодействия кориума с пластиной были выбраны 3 участка по высоте. С этой целью были вы-

резаны и подготовлены металлографические шлифы для дальнейших исследований (рисунки ба-в).

#### 3.2 Методы исследования

Исследования структуры материала выбранных областей проводились при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JSM-6390. СЭМ – изображения были получены во вторичных электронах в режиме высокого вакуума. Определение количественного элементного состава и картирование выбранных областей было выполнено с применением энергодисперсионного спектрометра JED-2300 при ускоряющем напряжении 20 кВ, рабочем расстоянии 10 мм и тока пучка 85-98 мкА. Качественный элементный анализ материала был проведен по элементам: U, Zr, Fe, Cr, Ni, O.

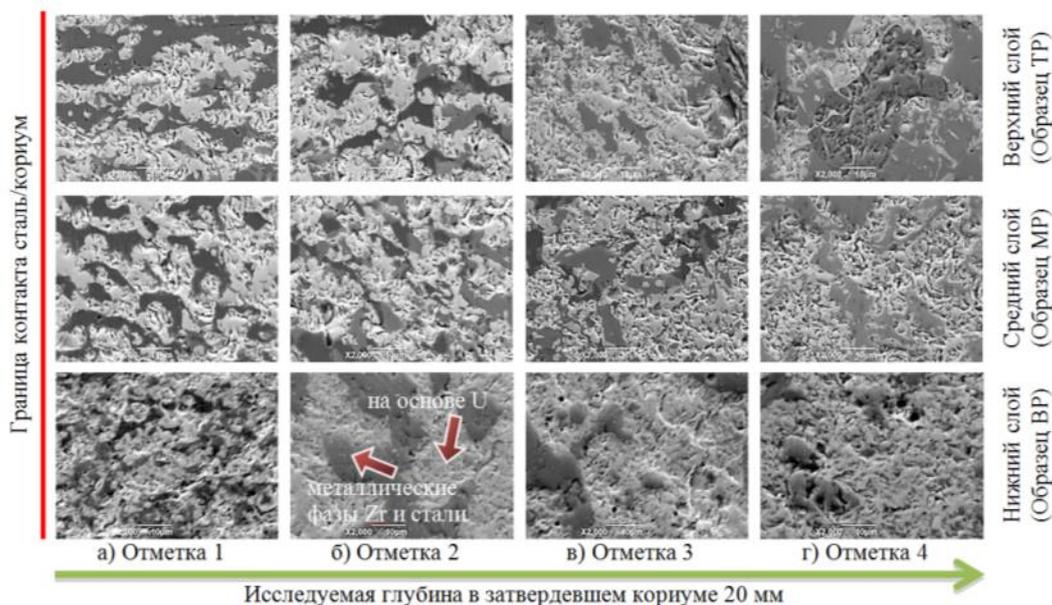


Рис. 7. Микроструктура кориума на разных отметках, в зависимости от глубины взаимодействия с пластиной стали SUS304 и по ее высоте

#### 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При исследовании полученных образцов были поставлены задачи по характеризации структуры прототипа кориума и определению компонентных составляющих, а также определение глубины взаимодействия стали SUS304 с кориумом.

Рассмотрим полученные результаты по структуре и характеру взаимодействия, по результатам исследования взаимодействия материала пластины SUS304 с прототипом кориума. Структура поверхности неоднородная. На снимках при увеличении  $\times 2000$  отчетливо видны 3 основные фазы на основе урана и металлические фазы на основе циркония и элементов стали, которые согласно СЭМ-изображениям светлые и темные цвета соответственно (рисунок 7). Структуру кориума в зоне взаимодействия с металлической пластиной SUS304, можно разделить на три слоя по высоте.

Согласно отметкам по поверхности образцов, в верхнем слое в зависимости от глубины взаимодействия микроструктура имеет изменение в сторону увлечения металлических фаз (рисунок 7г). Похожий характер взаимодействия сохраняется и для среднего слоя. При этом в нижней части объемное соотношение урансодержащих фаз с металлическими фазами отличается от верхней части. Наблюдается снижение содержания металлических фаз уже на отметке 2 в нижней части от границы контакта сталь/кориум. Согласно модели сечения ловушки после взаимодействия (рисунок 5) и диаграмме изменений показаний термомпар (рисунок 8), установленных на пластине SUS304, часть пластины, близкой к охлаждаемой донной части УПР, имела температуру ниже плавления стали SUS304, при этом мак-

симальные значения температур по показаниям термомпар в верхней части пластины находились в пределах 1640 - 2350 С. Соответственно, полное плавление пластины не произошло и степень взаимодействия стали была наименьшей в нижней части. Однако это не единственная причина неравномерного распределения основных структурных составляющих в зоне взаимодействия затвердевшего кориума. Во время затвердевания кориума с момента слива расплава в ловушку происходили процессы смешивания как результат конвекционных явлений в расплаве, которые привели к частичному вытеснению цирконий-содержащих фаз по направлению к поверхности урансодержащей частью расплава.

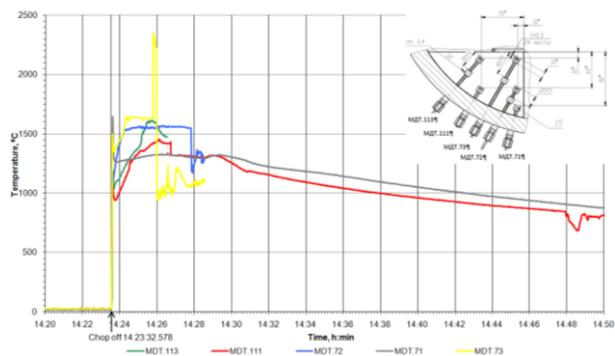


Рисунок 8. Изменение показаний термомпар, установленных в пластине стали марки SUS304

По данным СЭМ-ЭДС анализа и полученным результатам пространственного распределения элементов была составлена карта распределения основных элементов, содержащихся в затвердевшем расплаве кориума и стали SUS304 (рисунок 9). Обнаружено образование тонкого (300 мкм) монолитного

слоя расплавленной стали, параллельного к поверхности контакта с пластиной, с прожилками циркония. Так как в процессе взаимодействия произошло диффузионное высвобождение и перенос U и Zr из контактирующего слоя частиц кориума в жидкий металл и к диффузии компонентов пластины Fe, Cr в расплав кориума с образованием соединений металлического типа.

Оценка глубины проникновения стали SUS304 в кориум производилась путем определения элементного состава затвердевшего расплава кориума и пластины стали методом ЭДС-анализа. В качестве маркеров, показывающих наличие стали в кориуме были элементы Fe и Cr. В результате была определена глубина взаимодействия стали SUS304 с кориумом в процессе взаимодействия. По полученным данным установлено, что глубина взаимодействия стали с кориумом составляет в интервале  $4 \div 17$  мм, в зависимости от высоты (рисунок 10).

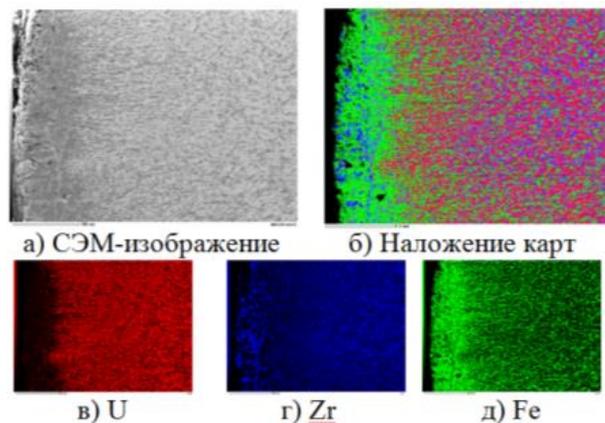
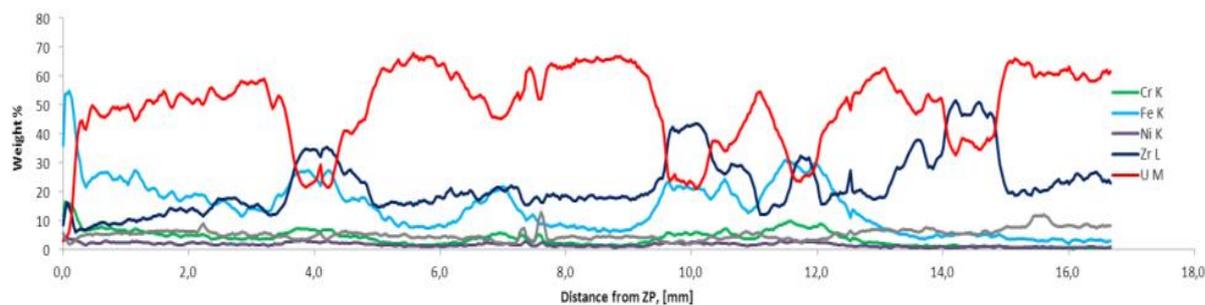
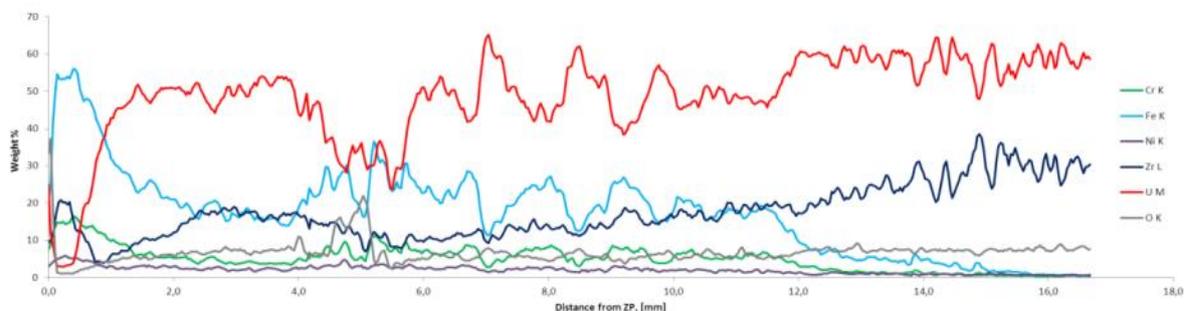


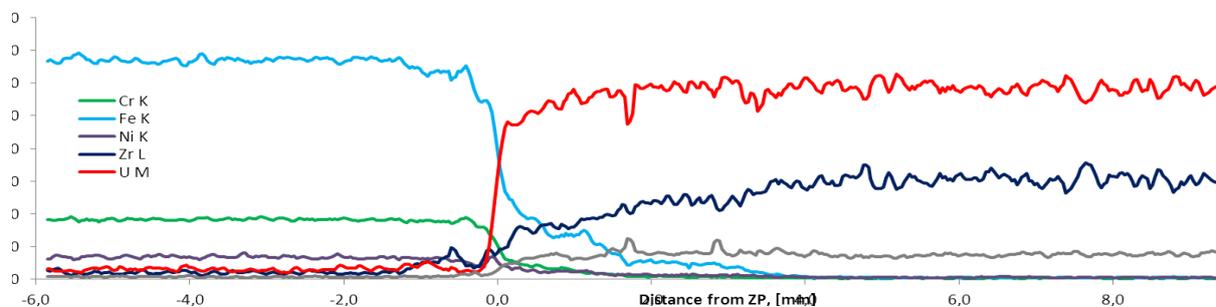
Рисунок 9. Пространственное распределение элементов в зоне контакта сталь/кориум в образце МР, при увеличении  $\times 100$



а) Образец ТР. Глубина взаимодействия в верхнем слое до 17 мм.



б) Образец МР. Глубина взаимодействия в среднем слое до 16 мм.



в) Образец МР. Глубина взаимодействия в нижнем слое до 4 мм.

Рисунок 10. Глубина взаимодействия стали SUS304 с кориумом

В итоге, слиток кориума можно разделить на 3 характерные слои по высоте. Верхний слой, обнаруженный в образце ТР, имеет толщину 20-25 мм. Макроструктура верхнего слоя состоит из двух структурных составляющих на основе оксидных фаз урана и циркония, а также металлических соединений. Максимальная глубина диффузионного проникновения стали SUS304 в кориум составляет 17 мм (рисунок 10а). В среднем слое в образце МР, толщиной до 60 мм, наблюдается характерные усадочные раковины и пористость материала. Структура этого слоя характеризуется дендритным строением. Максимальная глубина диффузионного проникновения стали в слиток кориума достигает 16 мм (рисунок 10б). Структура нижнего слоя в образце ВР затвердевшего расплава (20-25 мм от дна ловушки) схожа со структурой среднего слоя, но с направленными вытянутыми зёрнами твёрдого раствора на основе циркония в центральную область. Максимальная глубина диффузионного проникновения стали в слиток кориума составляет 4 мм (рисунок 10в).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования взаимодействия материала пластины SUS304 с прототипом кориума установлен характер взаимодействия конструкционного материала из стали SUS304 в виде пластины с рас-

плавом кориума. В структуре затвердевшего расплава видны 3 основные фазы на основе урана и металлические фазы на основе циркония и элементов стали. Структура кориума в зоне взаимодействия с металлической пластиной SUS304 разделяется на три слоя по высоте. В верхнем слое в зависимости от глубины взаимодействия микроструктура имеет изменение в сторону увлечения металлических фаз. Похожий характер взаимодействия сохраняется и для среднего слоя. При этом в нижней части объемное соотношение урансодержащих фаз с металлическими фазами отличается от верхней части. Наблюдается снижение содержания металлических фаз на границе контакта сталь/кориум, по причине неполного плавления пластины в этой области. Также причиной неравномерного распределения основных структурных составляющих в зоне взаимодействия затвердевшего кориума является частичное вытеснение цирконий содержащих фаз по направлению к поверхности урансодержащей частью расплава. Установлено образование тонкого монокристаллического слоя расплавленной стали с толщиной 300 мкм, параллельного к поверхности контакта с пластиной и определена глубина взаимодействия стали SUS304 с расплавом кориума, которая достигла 17 мм.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В.Г. Асмолов, Ю.Г. Дегальцев, И.Ф. Исаев, Н.П. Киселев, А.М. Ковалев, В.Ф. Стрижов, Ю.М. Уткин, Д.Ф. Цуриков, О.Я. Шах. Исследование процессов взаимодействия в корпусе реактора типа ВВЭР-1000 при тяжелой аварии. Взаимодействие металлических расплавов с засыпкой твердых частиц кориума. М. Москва. 2007.
2. V.S. Zhdanov, V.V. Baklanov. Facility for LWR Core Materials Studies at High Temperature/ Proceedings of ICAPP '05 Seoul, KOREA, May 15-19, 2005, Paper 5242.
3. В.С. Красноруцкий, В.К. Яковлев, А.П. Данилов, и т.д. Микроструктурный анализ лавоподобных топливосодержащих масс. Вопросы атомной науки и техники. 2010. №1. 60-67 стр.
4. A.A. Sulatsky, S.V. Bechta, V.S. Granovsky etc. Molten Corium Interaction with Oxidic Sacrificial Material of VVER Core Catcher. Proceedings of ICAPP '05 Seoul, KOREA, May 15-19, 2005, Paper 5240.
5. S.V. Bechta, V.S. Granovsky, V. B. Khabensky and etc. Interaction between molten corium  $UO_2+X-ZrO_2-FeO_y$  and VVER vessel steel. Nuclear technology. Vol.170. Apr. 2010. P-p. 210-218.
6. Бакланов В.В., Гречаник А.Д., Кукушкин И.М. Металлографические исследования кориума, полученного при моделировании тяжелой аварии реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Вестник НЯЦ РК, Выпуск 3, 2014. Стр. 40-46.
7. B.R. Sehgal, T.N. Dinh, T.J. Okkonen, etc. Studies on melt-water-structure interaction during severe accidents. Division of Nuclear Power Safety. Royal Institute of Technology. Sweden. 134 papers.

#### АЭС АУЫР АПАТТЫ МОДЕЛЬДЕУДЕ SUS304 КОНСТРУКЦИЯЛЫҚ БОЛАТПЕН КОРИУМ ПРОТОТИПІНІҢ ӨЗАНА ӘРЕКЕТТЕСУІН ЗЕРТТЕУ

М.К. Скаков, В.В. Бакланов, Е.Т. Коянбаев, В.А. Зуев, Е.Е. Сапатаев,  
А.Ж. Миниязов, И.М. Кукушкин, Е.А. Кожаметов

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Ұсынылған жұмыс ауыр апаттар кезінде жеңіл сулы реактордың активтік зона (кориум) материалдарының қатып қалған балқыманың амалдарын зерттеу бойынша міндеттерді шешу үдерісінде алынған нәтижелерді мазмұндайды, ерекшелігінде жұмыста SUS304 конструкциялық болатпен кориумның өзара әрекеттесу нәтижелері сипатталады және алынған мәліметтерге талдау жүргізіледі. Жүргізілген жұмыстың нәтижесінде микроқұрылым зерттелді және қатып қалған кориум прототипінің элементтік құрамы анықталды және АЭС ауыр апаттарды модельдеу жағдайларында SUS304 маркалы реактордың конструкциялық болатпен кориумның өзара әрекеттесу сипаттамасы зерттелді.

**STUDY OF INTERACTION OF CORIUM PROTOTYPE WITH CONSTRUCTIONAL  
STEEL SUS304 AT SIMULATION OF SEVERE ACCIDENT AT NPP**

**М.К. Skakov, V.V. Baklanov, E.T. Koyanbaev, V.A. Zuev, E.E. Sapataev,  
A. Zh. Miniyazov, I.M. Kukushkin, E.A. Kozhakhmetov**

*Institute of Atomic Energy Branch of the RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

This work contains the results obtained during solution of the problem to investigation of properties of the solidified melt of the core region materials (corium) of light-water reactor in event of severe accidents; in particular the work describes the results of interaction of corium with structural steel SUS304 and data analysis. The microstructure and elemental composition of the solidified corium prototype have been determined and the character of interaction of corium with the structural steel SUS304 grade of reactor under the conditions of severe accident simulation at nuclear power plant was analyzed in consequence of this work.

УДК: 620.1

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧЕННОГО НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ  $\text{SiO}_2+\text{C}$ <sup>1)</sup> Скаков М.К., <sup>1)</sup> Курбанбеков Ш.Р., <sup>1)</sup> Бакланов В.В., <sup>2)</sup> Мухамедова Н.М., <sup>2)</sup> Жамбаева М.К.<sup>1)</sup> Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан<sup>2)</sup> Государственный университет им. Шакарима г. Семей, Казахстан

Настоящая работа посвящена вопросам исследования силицированного графита, полученного методом порошковой металлургии. Подтверждено, что наиболее дешевым и перспективным материалом для изготовления силицированного графита является природное сырье (техническая сажа, кварц). В работе проведены исследования физико-механических свойств и структурно-фазового состояния опытных образцов силицированного графита, а также представлен материал-прототип для проведения сравнительного анализа.

**ВВЕДЕНИЕ**

Известно, что одним из широко применяемых и востребованных углеродосодержащих материалов в ядерной технике, металлургии и других областях промышленности является силицированный графит.

Важными областями применения силицированного графита являются черная и цветная металлургия (тигли, нагреватели, электроды, контейнеры и трубопроводы для транспортирования расплавленных металлов и др.); авиаракетная техника (детали реактивных турбин, газовые рули, конуса и вкладыши критического сечения), технология полупроводниковых материалов и интегральных микросхем (нагреватели подложки, пьедесталы, контейнеры и т.д.); производство стекла, керамики, алмазного инструмента (формы, стойкие к воздействию расплавленного стекла и т.д.), атомная энергетика (ТВЭЛ, ядерный графит и т.д.).

Все типы перспективных реакторов IV поколения и термоядерные установки, запланированные к созданию в ближайшие десятилетия, предусматривают повышение доз температуры облучения в активной зоне [1]. В результате становится невозможным использование радиационно-стойких сталей, являющихся в настоящее время основным реакторным материалом. Именно материалы на основе SiC рассматриваются развитыми странами, как наиболее перспективные для большинства разрабатываемых в мире реакторов и термоядерных установок IV поколения, поскольку только такие материалы способны сохранять длительную работоспособность под действием облучения до 150 сна и температурах 700-1000 °С, при работе в агрессивных средах, в том числе в виде расплавленных металлов, водяного пара и т.д. [2].

На сегодняшний день известен ряд различных способов получения силицированного графита, выбор того или иного способа, как минимум, определяется составом и агрегатным состоянием источника основного компонента кремния.

Наиболее широко распространен в промышленных условиях способ получения силицированного графита и изделий из него, заключающийся в пропитке углеродной основы расплавленным кремнием.

Он выгодно отличается от других процессов малым числом циклов, коротким временем изготовления и сравнительно невысокой стоимостью [3-5].

В мировой практике по технологии изготовления силицированного графита в качестве компонентов изделия используется готовая продукция из переработанного природного сырья [6].

Целью настоящей работы является отработка технологии получения силицированного графита, изучение микроструктуры, физико-механических свойств и микроструктуры полученных опытных образцов.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Для исследования изготовили образцы со следующим соотношением состава по массе:

Название	Процентное соотношение	
	SiO <sub>2</sub>	C
Образец А	70	30
Образец В	40	60
Образец С	60	40

Процесс получения шихты осуществляют путем совместного измельчения в шаровой вибромельнице FRITSCH до получения фракции менее 50 мкм с последующим контрольным рассевом через сито соответствующего размера. Смешивание компонентов проводят в шаровой мельнице в течение 45 мин.

Полученную смесь прессуют в пресс-форме из закаленной углеродистой стали при давлении 480 – 500 МПа, температуре 180 °С в течение 30 – 35 мин. Далее полученные заготовки, для обретения конечных технологических свойств, подвергают процедуре спекания. Спекание проводится в графитовом тигле на универсальном высокотемпературном стенде индукционного нагрева ВЧГ-135. Заготовки помещают внутрь графитового тигля, где между ними устанавливают графитовые дистанцирующие пластины. Полученную экспериментальную сборку помещают в рабочую камеру индукционной печи стенда ВЧГ-135, после чего в камере создают давление  $10^{-3}$  Па и заполняют инертным газом (аргон) до нормального давления. Процедура спекания заготовок включает два периода термообработки от комнатной температуры до 800 °С с выдержкой 20 – 30 мин и

последующий нагрев до 1580 – 1600 °С с выдержкой 90 – 100 мин. На рисунке 1 представлен температурный режим нагрева образца при спекании на ВЧГ-135, контроль нагрева ведется с помощью термопар.

По окончании эксперимента образцы выгружались из тигля, внешний вид образцов представлен на рисунке 2.

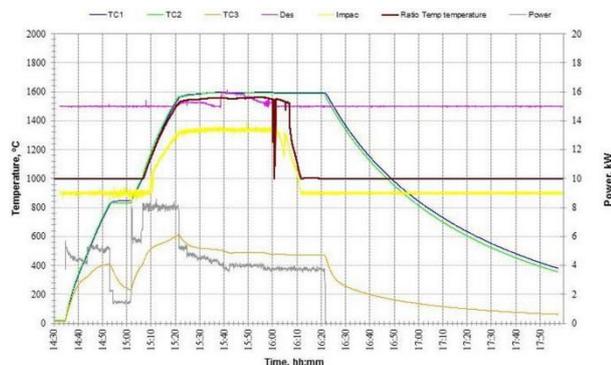


Рисунок 1. Температурный режим нагрева образцов на стенде ВЧГ-135

Рентгенофазовый анализ поверхностного слоя образцов осуществляли на дифрактометре ДРОН-3 с использованием  $\text{CuK}\alpha$ -излучения модернизированной современной цифровой системой регистрации RM-4;. Измерения микротвердости (Нц) образцов проводили по методу Виккерса на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузках на индентор - 50 г в соответствии с ГОСТ 9450-76. Морфологию структуры поверхности изучали на оптическом микроскопе OLYMPUS-BX41M, а так же проводился СЭМ-анализ, в котором проводятся микроструктурные исследования и определение элементного состава на растровом электронном микроскопе JSM-6390 с приставкой энергодисперсионного спектрометра JED-2300.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

При анализе микроструктуры поверхностей образцов было выявлено наличие трех фаз, различающихся как по цвету, так и по контрасту. Было установлено также, что в целом форма и средние размеры частиц каждой из фаз, как и характер взаиморасположения соседствующих частиц различных фаз сохраняются одинаковыми по всему сечению образца. При малых размерах пор, силицирование приводит к быстрому блокированию транспортных пор и полнота силицирования не достигается. При больших размерах пор, расплав кремния протекает через заготовку с высокой скоростью, что не способствует образованию карбида кремния, частично вытекает из нее. Только при некотором оптимальном размере пор обеспечивается их функционирование для транспортировки расплава кремния внутрь заготовки, со скоростью, достаточной для протекания реакции образования карбида кремния во всем объеме заготовки.



а) Образец А



б) Образец В



в) Образец С

Рисунок 2. Опытные образцы после спекания

Микроструктура полученного образца (при 1550 °С; состав шихты: 70 %  $\text{SiO}_2$ , 30 % сажа,) представляет собой двухфазную структуру, предположительно из карбида кремния с микротвердостью от 15100 МПа до 15900 МПа и  $\text{Si}(\text{O})_2$  с микротвердостью от 5900 МПа до 8700 МПа. Плотность данного образца составила 2,14 г/см<sup>3</sup>. Как видно на рисунке 3 в процессе формирования материала образовались поры, средний размер которых составляет около 20-25 мкм.

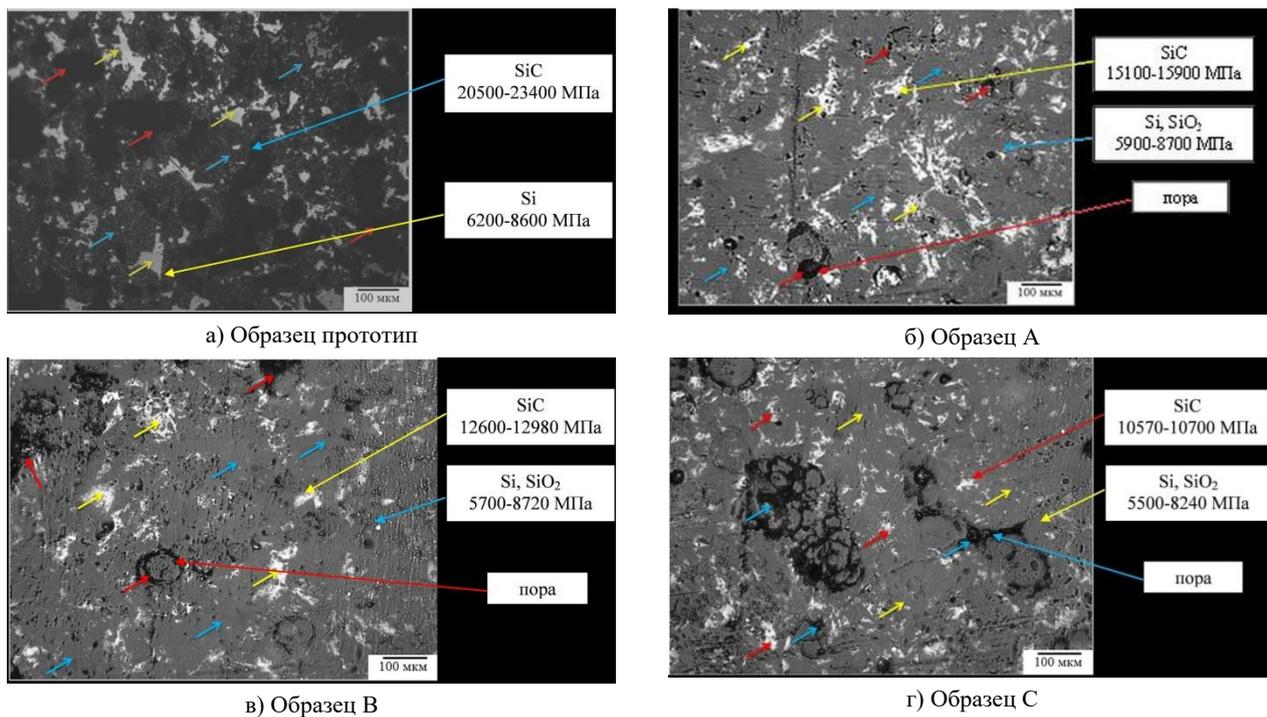


Рисунок 3. Микроструктура поверхности полученных образцов

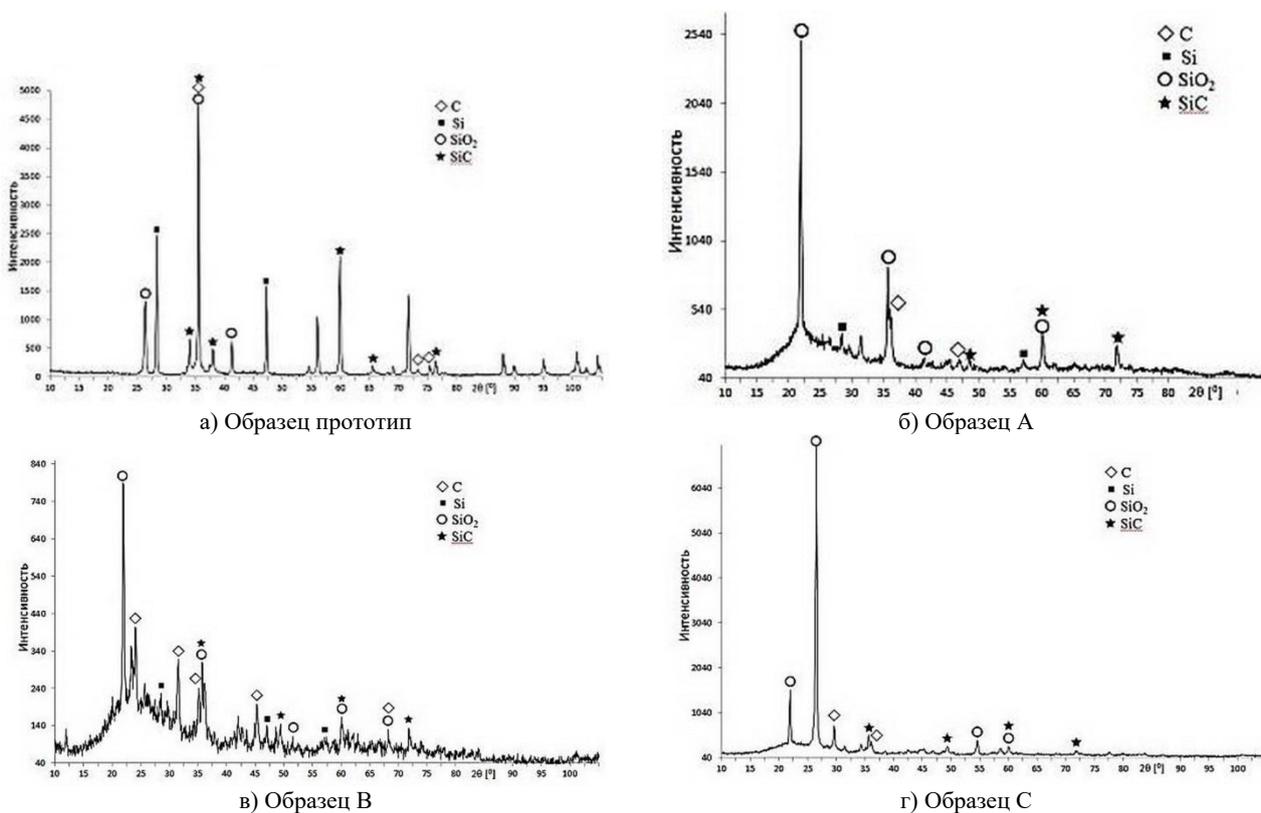


Рисунок 4. Рентгенофазовая дифрактограмма

Детальное исследование микроструктуры в различных участках поверхности показало, что в любом участке образца всегда фиксируется наличие двух фаз, различающихся по цвету. Было установлено также, что на поверхности шлифа образовались

поры и крупные выделения (предположительно это не прореагировавшие частицы кремния и углерода). При малых размерах пор, силицирование приводит к быстрому блокированию транспортных пор и полнота силицирования не достигается.

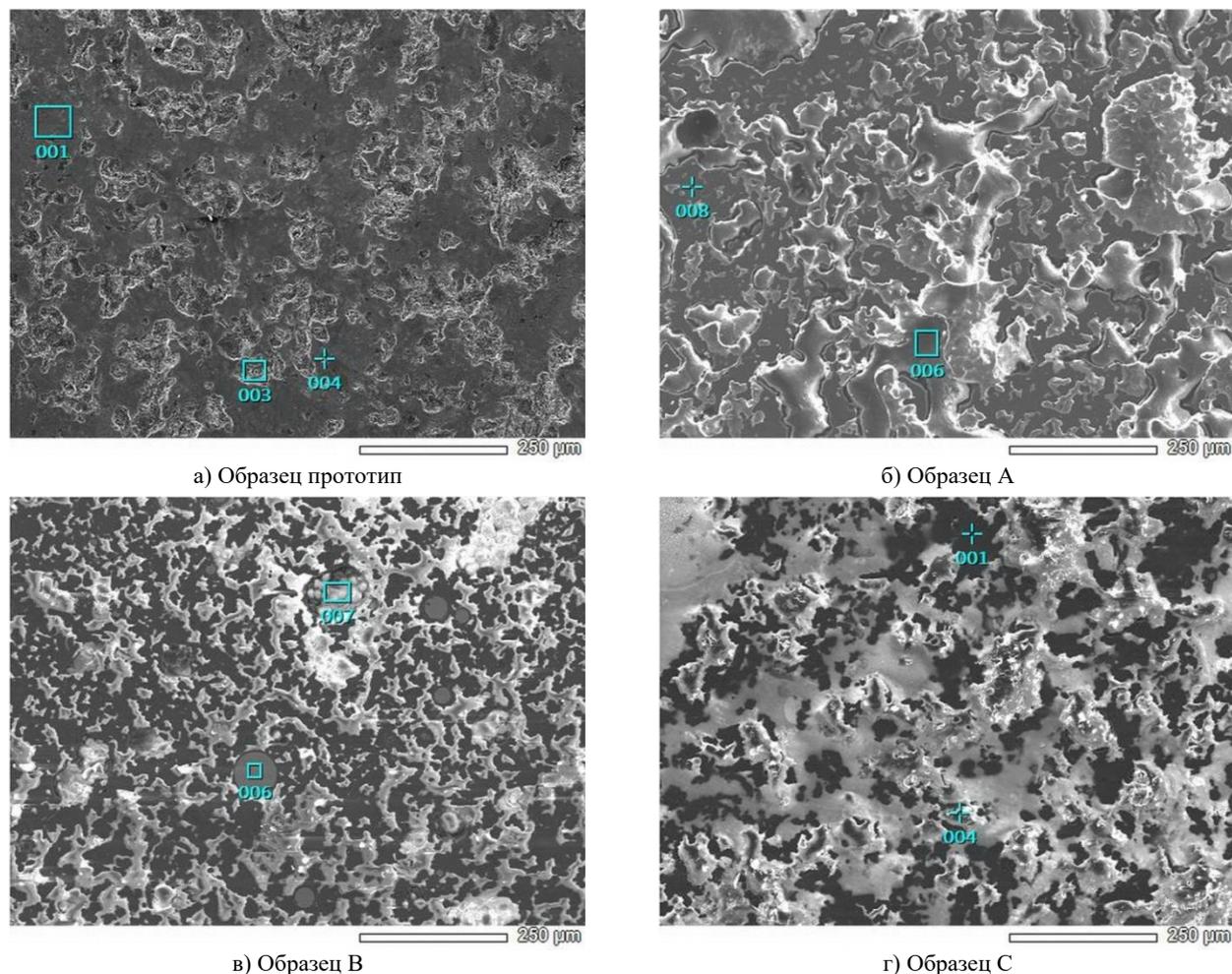


Рисунок 5. Результаты ЭДС анализа. Распределение элементов в масс.%

При больших размерах пор, расплав кремния протекает через заготовку с высокой скоростью, что не благоприятствует образованию карбида кремния, частично вытекает из нее. Только при некотором оптимальном размере пор обеспечивается их функционирование для транспортировки расплава кремния внутрь заготовки, со скоростью, достаточной для протекания реакции образования карбида кремния во всем объеме заготовки [7-9].

По данным рентгенофазового анализа (рисунок 5) видно, что материал, полученный при взаимодействии технического углерода с кварцевым песком, имеет аморфное состояние. Выявлено, что диоксид кремния и карбид кремния имеют гексагональную структуру с параметром кристаллической решетки 4,903 Å и 3,073 Å соответственно. Также обнаружены: углерод, кремний, что приводит и к предварительному разогреву системы с последующим образованием карбида ( $\text{SiO}_2+3\text{C}\rightarrow\text{SiC}+2\text{CO}$ ), который соответствует по структуре силицированному графиту. Тем не менее, при процессе получения силицированного графита сохранились фазы диоксида кремния, которые обладают высокой твердостью и прочностью.

В результате исследований образца прототипа и образцов были получены фотографии морфологии образца с распределением фаз и их элементного состава (рисунок 5). Элементный анализ образца прототипа показал, что химический состав включает в себя углерод (C) и кремний (Si) в разных соотношениях (рисунок 5 а). Элементный анализ образцов показал, что химический состав включает в себя не только углерод (C) и кремний (Si), но и кислород (O) (рисунок 5 б, в, г).

Результаты элементного анализа подтверждают, что свойства образцов (прототипа и образцов А, В, С) соответствуют свойствам силицированного графита. По результатам исследований можно предположить, что материал, состоящий из свободного углерода (C), кремния (Si) и карбида кремния (SiC), обладает высокой износостойкостью в жестких условиях абразивного изнашивания и повышенных температур, которая в свою очередь обеспечивается сочетанием высокой твердости и высокой теплопроводности [10-12].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проводя анализ полученных экспериментальных данных по получению опытного образца силицированного графита можно сделать следующие практически полезные выводы:

– экспериментальным путем определены основные требования к компонентам для получения силицированного графита (соотношение к массе: образец А – 70% SiO<sub>2</sub> и 30% С; В – 40% SiO<sub>2</sub> и 60% С; С – 60% SiO<sub>2</sub> и 40% С);

– отработаны технологические режимы спекания, на данный момент, оптимальная температура (1550 °С) и время процесса (50 мин с последующим охлаждением до комнатной в инертной среде рабочей камеры ВЧГ-135);

– установлено, что методами металлографических исследований структура полученного материала состоит из трех основных фаз, соответствующих силицированному графиту, это карбид кремния (SiC) с микротвердостью от 10840 МПа до 15900 МПа, свободный углерод (С) и кремний (Si) с микротвердостью от 5250 МПа до 8720 МПа. В качестве примесной фазы обнаруживается присутствие исходного компонента диоксида кремния (SiO<sub>2</sub>);

– выявлено, что методом рентгеноструктурного анализа полученная основная фаза имеют искомую гексагональную структуру карбида кремния (SiC) с параметром кристаллической решетки 0,3073 нм.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Силицированный графит / А.С. Тарабанов, В.И. Костиков. – М.: Металлургия, 1977. – 206 с.
2. Journal of Ceramic Processing Research. / Xiao Peng, Li Zhuana, Zhu Zi-bingb and Xiong Xiang. – 2010. – Vol. 11. – No. 3, P. 335-340.
3. Катков, О.М. Выплавка технического кремния. – Иркутск: изд-во ИПУ, 1997. – 243 с.
4. Получение материалов на основе SiC Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> методом высокоимпульсного плазменного спекания. С.Н. Перевислов, Д.Д. Несмелов, М.В. Томкович. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2013. - №2. – С. 107-114.
5. Новый высокоплотный жаростойкий материал на основе карбида кремния и кремния. С.В Дигонский, В.В. Тен. // Композиты и наноструктуры. – 2010. – № 2. – С. 36-55.
6. Толстогузов, Н.В. Теоретические основы и технология плавки кремнистых и марганцевых сплавов. М.: Металлургия, 1992. – 239 с.
7. Properties and Characteristics of Silicon Carbide, A.H. Rashed // Poco Graphite, Inc. 2002.–19 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.poco.com>, свободный.
8. Formation of dense silicon carbide by liquid silicon infiltration of carbon with engineered structure / J.C.Margiotta, D. Zhang, D.C. Nagle [et al.] // Materials Research Society. – 2008. – V. 23. – No. 5. – P. 1237-1248.
9. Разработка мелкозернистого силицированного графита с улучшенными свойствами. О.Ю. Сорокин, И.А. Бубненко, Ю.И. Кошелев, Т.В. Орехов. // Химия и химическая технология. – 2012. – Т. 55.- № 6. - С. 12-16.
10. Изучение технологии получения силицированного графита на основе карбида кремния, Ш.Р. Курбанбеков, И.И. Дерявко, В.В. Бакланов, А.Ж. Миниязов, А.Д. Даулеткелдыев, Р.М. Мухамеджанова, Б.Т. Оразымбеков, К.Б. Кобырова // Вестник НЯЦ РК. – 2015. – No. 3. – С. 5-9.
11. Siliconized graphite production technology / M.K.Skakov, Sh.R. Kurbanbekov, Y.T. Koyanbaev, V.V. Baklanov, A.Zh. Miniyazov, R.M. Mukhamedzhanova // International Conference on Circuits and Systems (CAS 2015), Paris, France 2015, August 9-10. – P. 215-218 (ATLANTIC PRESS, Thomson Reuters).
12. Электрофизические свойства композиционного материала на основе силицированной углеграфитовой ткани, С.К. Брантов, Н.Н. Кузнецов // Материаловедение. — 2002. – No. 5. – С. 25-27.

### SiO<sub>2</sub>+C ЖҮЙЕСІНІҢ НЕГІЗІНДЕ АЛЫНҒАН МАТЕРИАЛДЫ ЗЕРТТЕУ

<sup>1)</sup> М.К. Скаков, <sup>1)</sup> Ш.Р. Құрбанбеков, <sup>1)</sup> В.В. Бакланов, <sup>2)</sup> Н.М.Мухамедова, <sup>2)</sup> М.К. Жамбаева

<sup>1)</sup> ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

<sup>2)</sup> Шәкәрім атындағы Семей мемлекеттік университеті, Қазақстан

Осы жұмыс ұнтақтық металлургия әдісімен алынған силицирленген графитті зерттеу мәселелеріне арналған. Силицирленген графитті дайындау үшін ең арзан және ең перспективті материал табиғи шикізат (техникалық күйе, кварц) екені расталды. Жұмыста силицирленген графиттің тәжірибелік үлгілерінің физико-механикалық қасиеттері мен құрылымды-фазалық күйлері зерттеулері өткізілді. Сонымен қатар осы қасиеттер мен күйлерді салыстырмалы сараптау үшін силицирленген графиттің материал-прототипі ұсынылған.

**RESEARCH OF THE MATERIAL OBTAINED ON THE BASIS OF THE SYSTEM  $\text{SiO}_2 + \text{C}$**

<sup>1)</sup> M.K. Skakov, <sup>1)</sup> Sh.R. Kurbanbekov, <sup>1)</sup> V.V. Baklanov, <sup>2)</sup> N.M. Mukhamedova, <sup>2)</sup> M.K. Zhambayeva

<sup>1)</sup> *Institute of Atomic Energy Branch of the RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

<sup>2)</sup> *State University named after Shakarim Semey, Kazakhstan*

This paper deals with the issues of research siliconized graphite produced by powder metallurgy. It is confirmed that the cheapest and most promising material is a natural raw material for the manufacture of siliconized graphite (technical carbon black, silica). The paper studied the physical and mechanical properties and structural-phase state of prototypes siliconized graphite, and provides material prototype for comparative analysis.

УДК 621.039.5

## РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ КОРИУМА И ОГНЕУПОРНЫХ БЛОКОВ ЛОВУШКИ РАСПЛАВА УСТАНОВКИ «ЛАВА-Б»

Рамазанова К.М., Зуев В.А., Гановичев Д.А., Хажидинов А.С., Акаев А.С.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В выполненной работе разработана теплофизическая модель ловушки приема расплава установки «Лава-Б» с учетом плазматронов, имитирующих остаточное тепловыделение в кориуме. Проведен нестационарный тепловой расчет кориума и огнеупорных блоков ловушки расплава. Приведены результаты расчета значений температуры огнеупорных блоков.

### ВВЕДЕНИЕ

В Институте Атомной Энергии на установке «Лава-Б» проведены эксперименты по исследованию взаимодействия кориума с жаростойкими материалами, которые могут быть использованы для защитного покрытия в ловушках расплава активной зоны ядерного реактора (ловушка расплава).

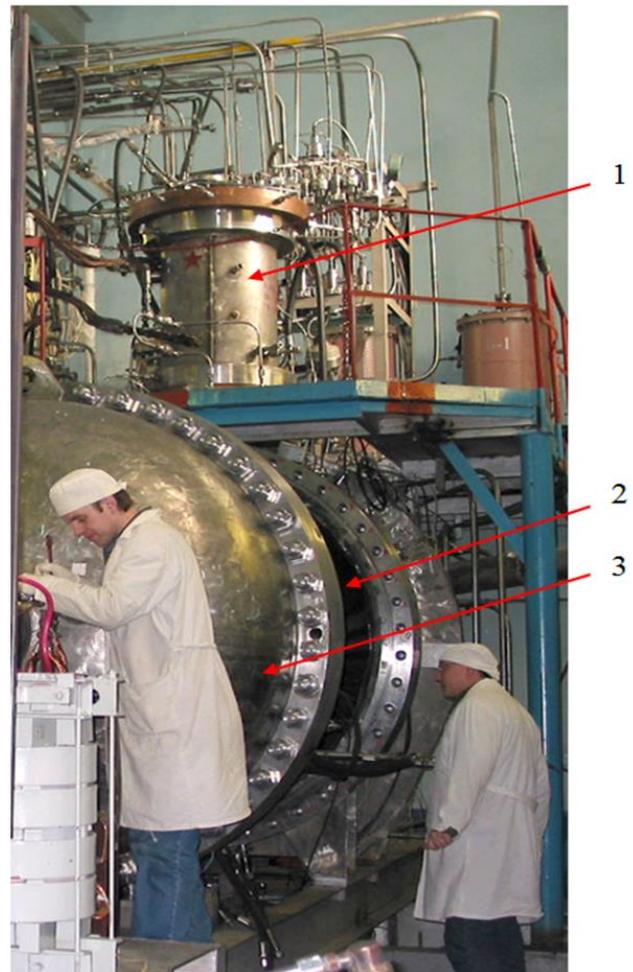
Ловушка расплава предназначена для снижения радиоэкологических последствий тяжелой аварии. Расплав образуется при тяжелой аварии с расплавлением активной зоны. Одной из важнейших задач в случае тяжелой аварии на ядерном реакторе является сохранение герметичности контейнента, являющегося последним барьером на пути распространения продуктов деления (ПД) в окружающую среду. Для решения этой задачи предлагаются различные варианты ловушки расплава. Независимо от ее конструктивного оформления основное назначение ловушки состоит в том, чтобы: вместить и удержать от распространения всю массу расплава; обеспечить снижение температуры и эффективный отвод остаточного энерговыделения ПД; предотвратить проплавление основания шахты реактора (как правило, бетонное) и разрушение основных конструкций контейнента внутри герметичной оболочки.

Эксперименты на установке «Лава-Б» проведены с целью определения наиболее оптимального огнеупорного материала, который в дальнейшем будет использован в качестве облицовки ловушки расплава ядерных реакторов. Результатом проведенных экспериментов на установке «Лава-Б» является характер разрушения огнеупорных блоков, и зависимость температуры огнеупорных блоков от времени. Зачастую в ходе проведения экспериментальных работ на установке «Лава-Б», термопары, определяющие температуру кориума и огнеупорных блоков, выходят из строя. Таким образом, становится актуальной задача восстановления аналитическим путем значений температуры в контрольных точках, в которых в ходе проведения эксперимента термопары вышли из строя. Данная работа направлена на разработку и валидацию теплофизической модели ловушки приема расплава установки «Лава-Б». Разработанная модель позволяет решить проблему потери температурных данных, а также прогнозировать

температурные поля огнеупорных блоков и кориума.

### 1 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

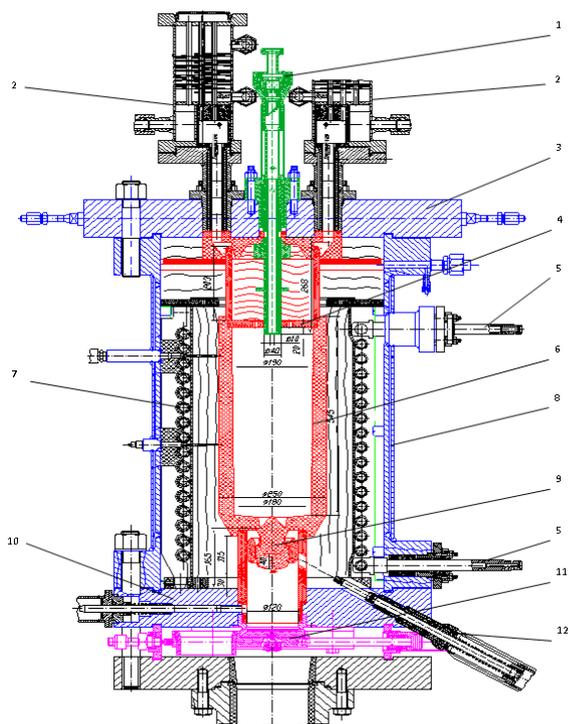
Внешний вид экспериментальной установки «Лава-Б» приведен на рисунке 1. Конструктивно установка состоит из двух основных узлов: электрической плавильной печи (ЭПП) и устройства приема расплава (УПР).



1 – ЭПП; 2 – устройство приема расплава (УПР);  
3 – съемная крышка УПР.

Рисунок 1. Установка «Лава-Б»

**РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ КОРИУМА И ОГНЕУПОРНЫХ БЛОКОВ  
ЛОВУШКИ РАСПЛАВА УСТАНОВКИ «ЛАВА-Б»**



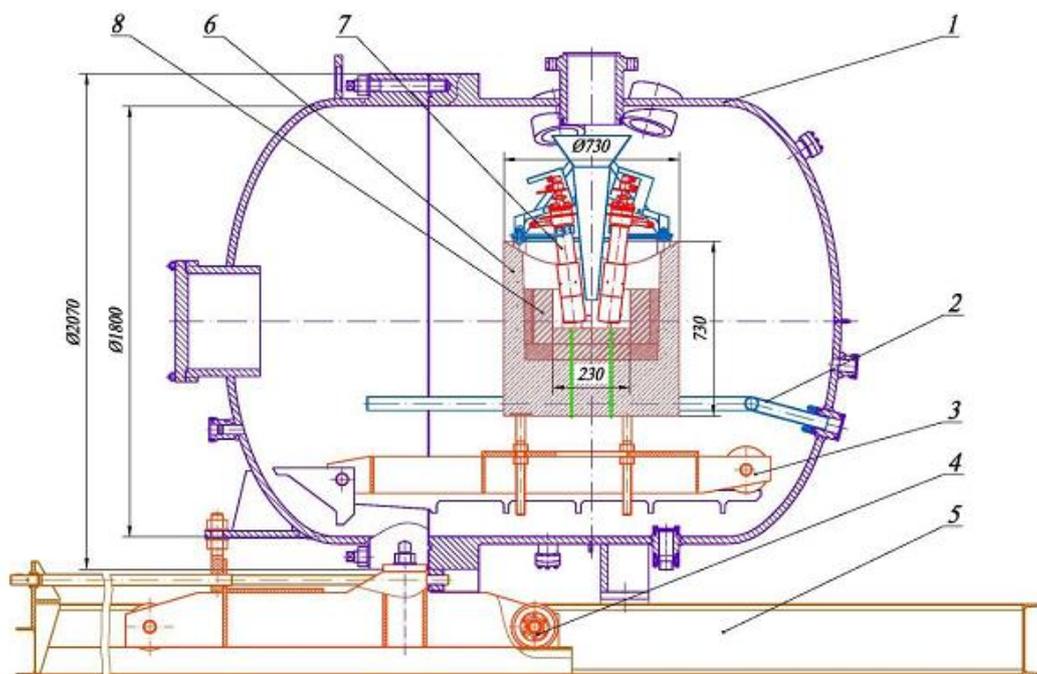
- 1 – узел визирования пирометра; 2 – теплообменник;  
3, 10 – медные фланцы; 4 – крышка тигля; 5 – токоввод; 6 – тигель;  
7 – индуктор; 8 – корпус ЭПП; 9 – пробка тигля; 11 – затвор;  
12 – механизм разрушения пробки.

Рисунок 2. Конструктивная схема ЭПП

Конструктивная схема ЭПП приведена на рисунке 2. Электроплавильная печь, индукционного типа, предназначена для плавления шихты различных композиций, состоящей из тугоплавких материалов, и слива расплава в экспериментальную секцию (ловушку расплава) УПР.

Основными узлами и элементами ЭПП являются: корпус плавильной печи; узел отвода отходящих газов; водоохлаждаемый индуктор; собственно плавильная камера - графитовый тигель; пакет теплоизоляции; устройство для разрушения пробки тигля, закрывающей сливное отверстие; шиберный затвор, перекрывающий сливной канал между ЭПП и УПР установки.

Устройство приема расплава установки «Лавы-Б» изготовлено из нержавеющей стали и представляет собой цилиндрический сосуд с двумя эллиптическими днищами. Одно из этих днищ приварено к цилиндрической части сосуда, а другое соединяется с цилиндрической частью с помощью фланцевого соединения. Ось цилиндрической поверхности сосуда располагается горизонтально. На верхней части цилиндрической поверхности УПР находится горловина с диаметром проходного сечения 200 мм, на которую устанавливается электроплавильная печь. Конструктивная схема УПР установки «Лавы-Б» приведена на рисунке 3.



- 1 – емкость УПР; 2 – парогазопровод; 3 - устройство передвижения ловушки; 4 – тележка; 5 – рама;  
6 – ловушка бетонная (АК.21272.00.000); 7 – плазматрон; 8 – огнеупорные блоки.

Рисунок 3. Конструктивная схема УПР установки «Лавы-Б»

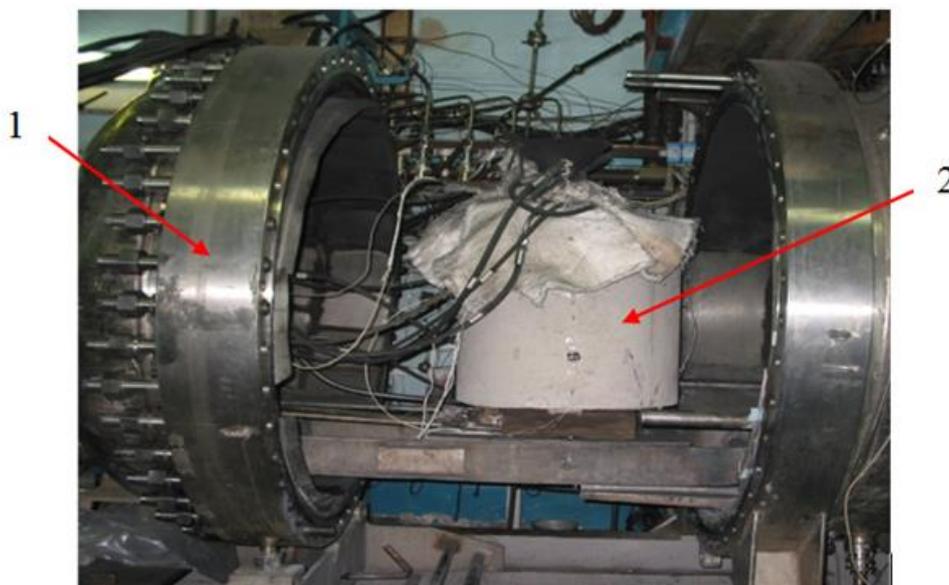
Съемное эллиптическое днище после отсоединения его от цилиндрической части корпуса может перемещаться в горизонтальном направлении с помощью специального устройства. Со стороны внутренней полости УПР к съемному днищу подсоединена платформа, на которую устанавливается используемое экспериментальное оборудование. На рисунке 4 приведен общий вид бетонной ловушки расплава, установленной внутри УПР.

Конструктивная схема бетонной ловушки расплава с огнеупорными блоками и схема расстановки термопар в ней показаны на рисунке 5.

В УПР используется плазматронная система нагрева расплава в бетонной ловушке. Плазматронная

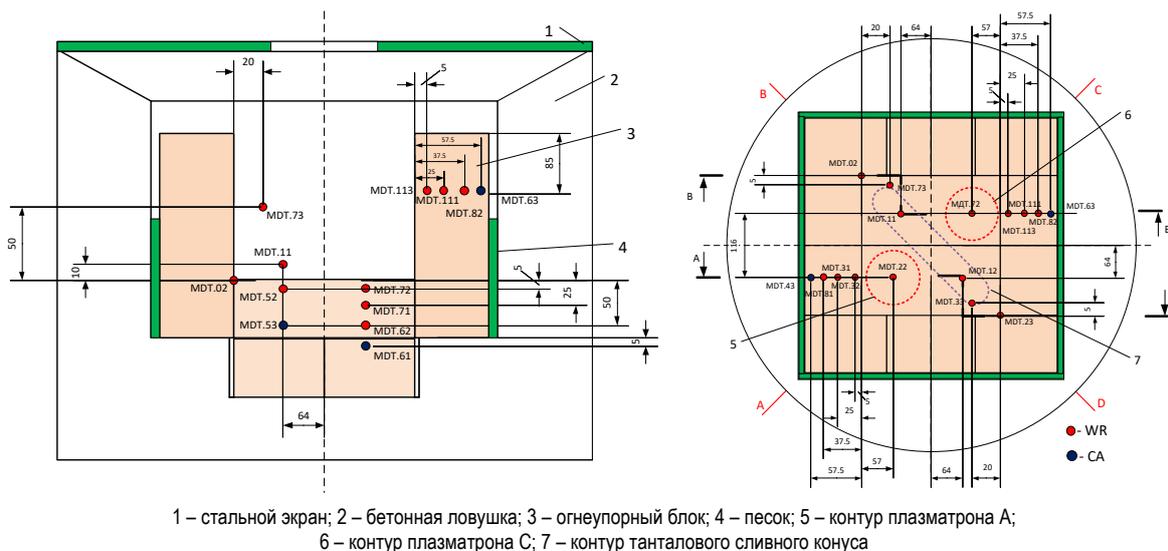
система нагрева расплава в бетонной ловушке предназначена для имитации остаточного тепловыделения в расплаве кориума. На рисунке 6 представлена ловушка расплава с установленными в ней плазматронами. Электроды плазматрона изготовлены из меди и расположены коаксиально. На рабочую часть каждого электрода, на резьбовом соединении, крепится наконечник из графита. На рисунке 7 приведен вид работающего плазматрона.

Во время эксперимента происходит нагрев и плавление шихты в плавильном графитовом тигле и, после разрушения пробки тигля, расплав сливается в ловушку расплава.



1 – съемная крышка УПР; 2 – ловушка бетонная

Рисунок 4. Внешний вид бетонной ловушки расплава установки «Лав-Б»



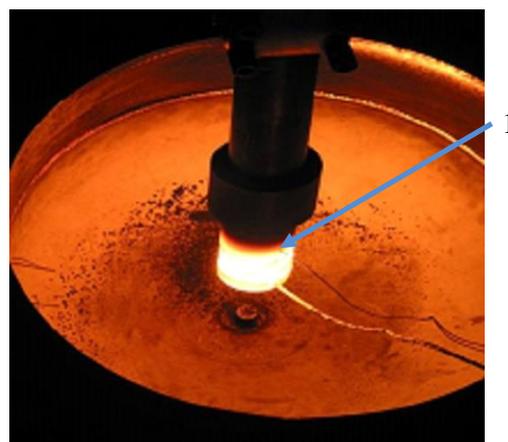
1 – стальной экран; 2 – бетонная ловушка; 3 – огнеупорный блок; 4 – песок; 5 – контур плазматрона А; 6 – контур плазматрона С; 7 – контур танталового сливного конуса

Рисунок 5. Конструктивная схема и схема расстановки термопар в бетонной ловушке



1 – плазматроны; 2 – огнеупорные блоки; 3 – бетонная ловушка

Рисунок 6. Ловушка расплава с установленными в ней плазматронами



1 – внешний наконечник плазматрона

Рисунок 7. Вид сверху на ловушку расплава с установленным в ней плазматроном

## 2 РАСЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ МОДЕЛИ

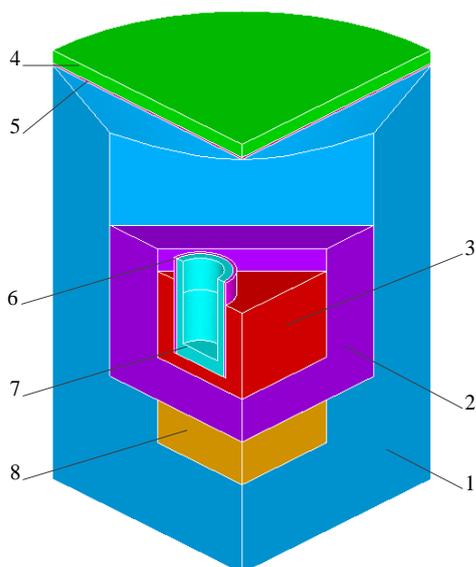
### Исходные данные и условия расчета

Начальная температура кориума в ловушке расплава принята равной 2200 °С, масса кориума равна 46 кг. Материальный состав кориума: массовая доля Zr 0,325; массовая доля ZrO<sub>2</sub> 0,035; массовая доля UO<sub>2</sub> 0,638. Бетонная ловушка расплава внутри выложена огнеупорными блоками.

Теплофизические свойства материалов взяты из справочной литературы [1, 2].

Расчетная модель приведена на рисунке 8. На рисунке 9 приведена конечно-элементная сетка расчетной модели. Рассматриваемая модель симметрична, смоделирована четвертая часть ловушки расплава в

расчетной программе ANSYS [3, 4, 5], в состав которой входит внешний наконечник плазматрона С. Контрольные точки (к.т), расположенные рядом с плазматроном С: МДТ.113, МДТ.111, МДТ.82, МДТ.72, МДТ.71 и МДТ.62. В качестве граничного условия используется плотность теплового потока, который задается на внутреннюю поверхность внешнего наконечника плазматрона. Тепловой поток рассчитан по экспериментальным значениям электрических параметров плазматрона. В расчетной модели учитывается теплообмен излучением между поверхностью кориума, бетонной ловушкой и тепловым экраном, а так же конвективный теплообмен между внешними поверхностями модели и окружающей средой.



1 – бетон; 2 – огнеупорный блок; 3 – кориум; 4 – суперсил; 5 – сталь 3;  
6 – графитовый войлок; 7 – внешний наконечник плазматрона С;  
8 – огнеупорный блок, нижний слой

Рисунок 8. Расчетная модель

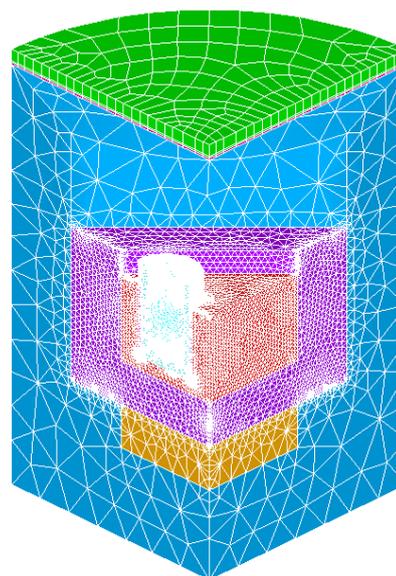


Рисунок 9. Конечно-элементная сетка расчетной модели

### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

В ходе проведения экспериментов на установке «Лав-Б», за 5-10 минут до слива расплава из тигла ЭПП в ловушку расплава производится включение плазматронов. После слива расплава плазматроны работают в течение ~2 часов. Данный расчет выполнен с целью валидации расчетной модели. В качестве исходных данных для выполнения расчета использовались электрические параметры плазматронов, реализованные в ходе проведения эксперимента.

Расчет состоит из двух этапов. На первом этапе плазматроны работали в течение 609 секунд без кориума. Спустя 609 с после включения плазматронов был осуществлен слив расплава. После слива расплава плазматроны работали 2593 с.

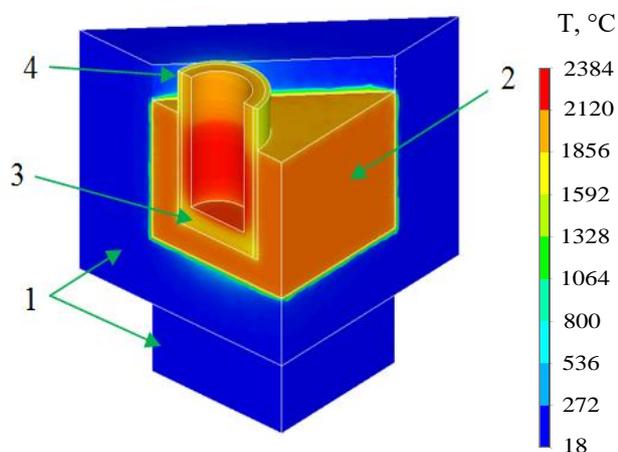
На рисунках 10 и 11 приведено температурное поле огнеупорного блока, кориума, внешнего нако-

нечника плазматрона в начальный момент после слива расплава и после отключения плазматронов.

На рисунке 12 приведены экспериментальные и расчетные значения температуры огнеупорных блоков.

Из графика, приведенного на рисунке 12, видно, что расчетные значения температуры в боковых блоках (к.т. МДТ.113, к.т. МДТ.111 и к.т. МДТ.82) отличаются от экспериментальных значений температуры в соответствующих контрольных точках в среднем на 5,1 %, 9 % и 8,5 % соответственно.

Отличие между экспериментальными значениями температуры, регистрируемые термопарами в донных блоках (МДТ.72, МДТ.71 и МДТ.62), и расчетными значениями температуры в соответствующих контрольных точках составляет в среднем 3,9 %, 8,2 % и 7,4 % соответственно.



1 - огнеупорный блок; 2 – кориум; 3 - внешний наконечник плазматрона С; 4 - теплоизоляция плазматрона.

Рисунок 10. Температурное поле в начальный момент после слива расплава

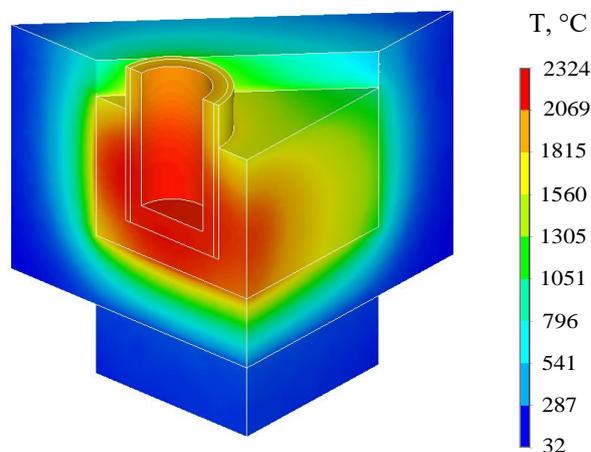


Рисунок 11. Температурное поле огнеупорного блока, кориума, внешнего наконечника плазматрона после отключения плазматронов

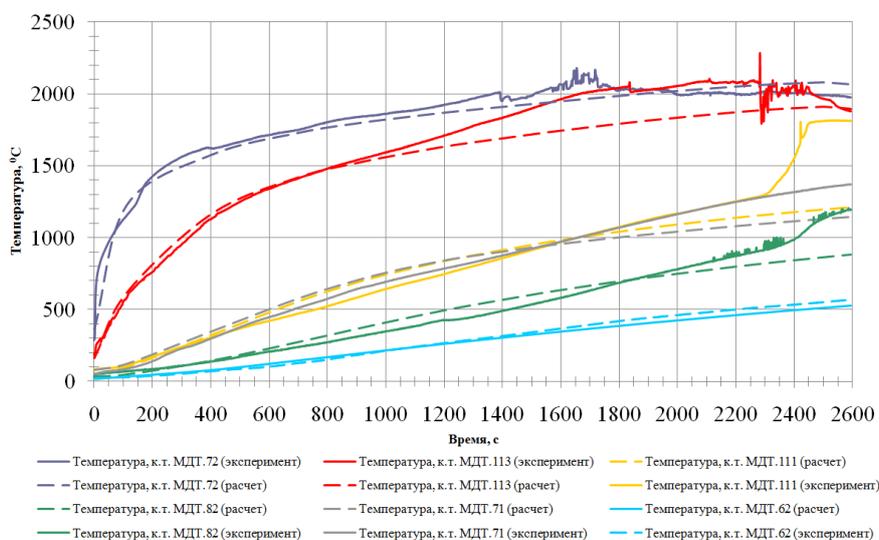


Рисунок 12. Экспериментальные и расчетные значения температуры огнеупорных блоков

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ходе работ по данной теме получены следующие результаты:

- разработана теплофизическая модель ловушки приема расплава установки «Лава-Б» с учетом плазматронов, имитирующих остаточное тепловыделение в кориуме;
- проведен нестационарный тепловой расчет кориума и огнеупорных блоков ловушки расплава установки «Лава-Б»;
- выполнена валидация разработанной модели путем сравнения экспериментальных значений температуры с расчетными значениями температуры.

Расчетные значения температуры в боковых блоках (к.т. МДТ.113, к.т. МДТ.111, к.т. МДТ.82) и в донных блоках (к.т. МДТ.72, к.т. МДТ.71 и к.т. МДТ.62) отличаются от экспериментальных значений температуры не более чем на 10%;

– разработанная теплофизическая модель ловушки приема расплава установки «Лава-Б» была использована для восстановления расчетным путем значений температуры в контрольных точках, в которых вышли из строя термопары в ходе проведения экспериментов.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. RADIATIVE EMISSIVITY OF METALS AND OXIDIZED METALS AT HIGH TEMPERATURE, George Teodorescu, Dissertation, Auburn University, 2007.
2. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : «Энергия», 1977.
3. Сборник руководств программы ANSYS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://support.ansys.com/training>.
4. Сборник руководств программы ANSYS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://support.ansys.com/documentation>.
5. Сборник руководств программы ANSYS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://support.ansys.com/docinfo>.

## **«ЛАВА-Б» ҚОНДЫРҒЫСЫНЫҢ БАЛҚЫМА ҚАҚПАНДАРЫНЫҢ ОТҚА ТӨЗГІШ БЛОКТЕРІ ЖӘНЕ КОРИУМНІҢ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ ӨРІСІНІҢ ЕСЕБІ**

**К.М. Рамазанова, В.А. Зуев, Д.А. Гановичев, А.С. Хажидинов, А.С. Акаев**

*ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан*

Орындалған жұмыста кориумдағы қалдықты жылу бөлуді еліктеуші плазматрондарды есепке ала отырып, «Лава-Б» қондырғысының балқымаларды қабылдау қақпанының жылуфизикалық моделі жетілдірілді. Кориум мен балқыма қақпанының отқа төзгіш блоктарының стандартты емес есебі жүргізілді. Отқа төзгіш блоктардың температуралық мағынасы есебінің нәтижесі келтірілді.

## **COMPUTATION OF THE CORIUM TEMPERATURE FIELD AND MELT TRAP REFRACTORY BLOCKS OF LAVA-B FACILITY**

**K.M. Ramazanova, V.A. Zuev, D.A. Ganovichev, A.S. Khazhidinov, A.S. Akayev**

*Institute of Atomic Energy RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

The paper presents thermophysical model of LAVA-B melt receiver, which was developed taking into account plasmatron simulating afterheat release in the corium. Non-stationary thermal computation of corium and melt trap refractory blocks is carried out. Computation data of refractory blocks' temperature value is presented.

УДК 658.012.011.56:658:512

## ВТОРОЙ ЭТАП МОДЕРНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ИВГ.1М

Коровиков А.Г., Ермаков В.А., Серикбаев Б.С.

*Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

С 2010 года и по настоящее время в филиале «Институт атомной энергии» РГП Национальный ядерный центр Республики Казахстан (далее филиал ИАЭ) проводятся работы по модернизации информационно-измерительной системы (ИИС) исследовательского реактора ИВГ.1М. В рамках I этапа с 2012 по 2014 годы проведена работа по модернизации ИИС системы автоматического управления (САУ), системы управления и защиты (СУЗ). Приобретено оборудование, программное обеспечение и материалы. Разработаны алгоритмы обработки данных от первичных преобразователей и экраны представления информации операторам пультов. Выполнен монтаж оборудования, и проведены пуско-наладочные работы. На 2016-2017 годы филиалу ИАЭ выделены средства в рамках технического сотрудничества с МАГАТЭ. В рамках которого, планируется осуществить второй этап модернизации, охватывающий модернизацию ИИС контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА) и контроля герметичности оболочек (КГО). В результате данной работы будет усовершенствован процесс контроля, регистрации, отображения экспериментальной информации систем КИПиА и КГО.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в РК эксплуатируется три реакторных установки с исследовательскими реакторами, и одна находится в режиме длительного останова. В качестве технических средств вычислительных комплексов информационно-измерительных систем (ИИС) реакторных установок используются физически и морально изношенные аппаратные комплексы, используется морально устаревшее программное обеспечение, которые не могут реализовать функцию обеспечения безопасности ядерного реактора.

Наличие точной оперативной информации о работе реактора является одним из важнейших условий разумной и адекватной реакции операторов и систем автоматического регулирования на любые ситуации, возникающие как в условиях нормальной эксплуатации, так и в аварийных ситуациях. Актуальность определяется важностью ИИС для реализации функций обеспечения безопасности любого ядерного реактора, включая реактор ИВГ.1М.

Таким образом, целью данной работы является увеличение показателей надежности РУ ИВГ.1М путем модернизации ИИС.

Объект исследования является ИИС исследовательского реактора ИВГ.1, в части подсистем контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА) и контроля герметичности оболочек (СКГО).

В рамках первого этапа в соответствии с планами работ, в 2014–2015 году было осуществлено модернизация систем автоматического управления (САУ), системы управления и защиты (СУЗ) и проведена частичная модернизация системы контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА).

На 2016-2017 по плану будет осуществлена модернизация ИИС КИПиА и КГО.

### ПЕРВЫЙ ЭТАП МОДЕРНИЗАЦИИ ИИС

В 2010 году сотрудниками ИАЭ был разработан технический проект «Информационно-измерительная система исследовательского реактора ИВГ.1М», который получил положительное заключение государственной экспертизы, а также прошел согласование в Комитете по атомной энергетике РК.

Структура ИИС, разработанная в рамках технического проекта [2] является территориально-распределенной, унифицированной по интерфейсам и протоколам системой с тремя уровнями иерархии (рисунок 1), основана на вычислительной сети радиальной топологии и включает в свой состав девять автоматизированных рабочих мест операторов (АРМ), шесть контроллеров сбора и обработки информации и местных пультов операторов, два сервера базы данных и экран коллективного пользования:

– *нижний уровень ИИС ИВГ (уровень I)* – осуществляет функции измерения в реальном масштабе времени по заданным параметрам, сбор, регистрацию, первичную обработку измерительной информации о контролируемых технологических параметрах по всем подсистемам ИИС, формирование и выдачу сигналов предупредительной сигнализации и аварийной защиты из подсистемы КИПиА в подсистему САУ;

– *средний уровень ИИС ИВГ (уровень II)* – осуществляет прием данных от контроллеров подсистем нижнего уровня и регистрацию текущих значений измеряемых параметров, обработку и отображение текущего состояния подсистем нижнего уровня, передачу команд для переключения режимов контроллеров нижнего уровня;

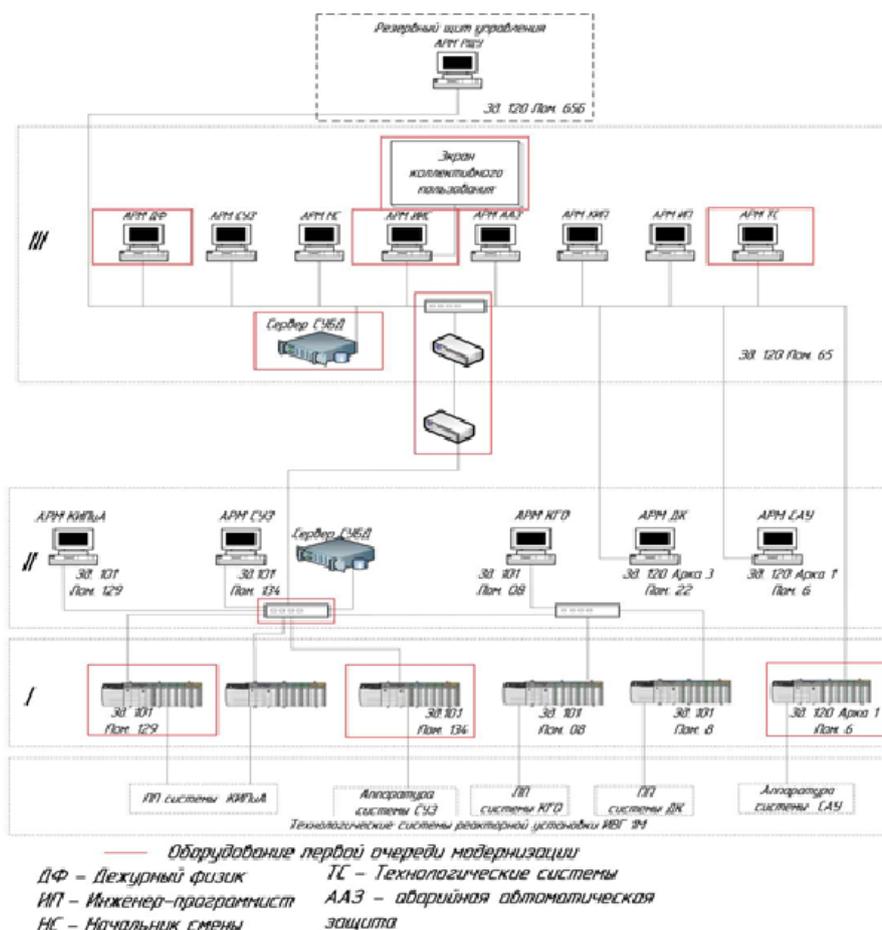


Рисунок 1. Структурная схема ИИС ИВГ.1М

– верхний уровень ИИС (уровень III) – осуществляет функции управления режимами работы ИИС ИВГ в целом; обеспечивает централизованное хранение измерительной информации за любой заданный интервал времени; координацию работы уровней ИИС ИВГ между собой; информационную поддержку АРМ в центральной пультовой, отображение заданных групп текущих значений измерительной и служебной информации в виде таблиц, графиков, гистограмм, мнемосхем и других визуальных фрагментов на экране коллективного пользования.



Рисунок 2. Контроллер Allen Bradley серии 1756

В качестве оборудования нижнего уровня системы было выбрано оборудование компании Allen-

Bradley (рисунок 2), так как оно занесено в реестр государственной системы обеспечения единства измерений Республики Казахстан и обладает высокими эксплуатационными и техническими характеристиками, в том числе по таким показателям как коэффициент готовности (Kг), средняя наработка на отказ (ТО), время восстановления (ТВ), назначенный ресурс работы (ТРН).

В качестве ПО АРМ операторов и местных пультов ИИС ИВГ выбрано программное обеспечение SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition System) система RSView32 производства компании Rockwell Automation. RSView32 включает инструменты для создания человеко-машинного интерфейса, включая анимированные графические дисплеи реального времени, тренды, а также сводки по сигналам тревоги и событиям системы, методы регистрации технологических данных.

В период с 2012 по 2014 годы проведен первый этап модернизации, в рамках которого проведена модернизация ИИС САУ и ИИС СУЗ и частичная модернизация ИИС КИПиА, разработана эксплуатационная документация.



Рисунок 3. Существующая СПИ САУ ИВГ.1М

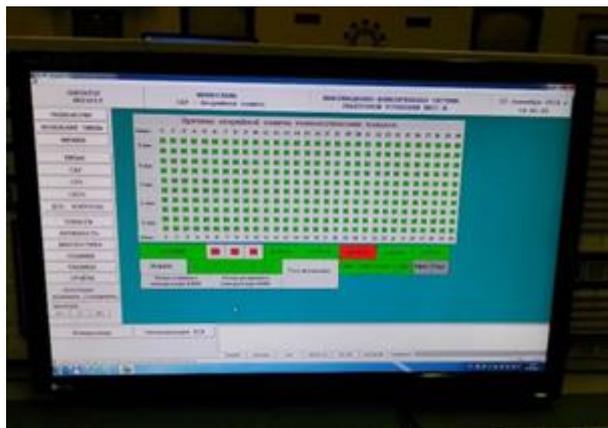


Рисунок 4. СПИ САУ ИИС



Рисунок 5. Существующая СПИ СУЗ ИВГ.1М



Рисунок 6. СПИ СУЗ ИИС



Рисунок 7. Существующая СПИ КИПуА ИВГ.1М

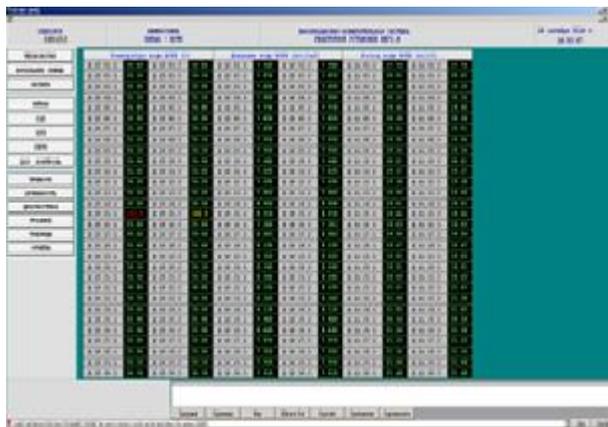


Рисунок 8. СПИ КИПуА ИИС

На рисунках 3-8 представлены результаты модернизации систем представления информации (СПИ) ИИС. Сравнение эффективности, разработанной и существующей ИИС показало, что разработанная ИИС значительно превосходит существующую систему по всем показателям эффективности [3]:

– *быстродействие*. За счет применения современного оборудования и программного обеспечения, производства компании Allen Bradley, достигнута частота опроса всех ИК системы 50 Гц и скорость регистрации данных на сервер – 10 Гц. Данный показатель более чем в 10 раз превышает показатели существующих ИИС исследовательских реакторных установок РК;

– *масштабируемость*. Предложенная многоуровневая структура системы позволяет увеличивать количество контроллеров, модулей в контроллерах, местных пультов, станций операторов. Новые контроллеры могут располагаться практически в любом помещении реакторной установки, для включения в систему, необходимо лишь привести интерфейс Ethernet в это помещение. При современном развитии сетевых технологий это не составляет труда (медный или оптический кабель, Wi-Fi и т.д.);

– *надежность*. Разработанный макет системы обладает высокой надежностью, за счет применения основного оборудования, обладающего высокими показателями наработки на отказ (MTBF), например, показатель MTBF контроллера системы составляет 815822 часов или средняя продолжительность работы устройства между ремонтами около 93 лет. Расчет свидетельствует о том, что вероятность того, что системы САУ и СУЗ окажутся в работоспособном состоянии более 99,99 % и соответствует ГОСТ;

– *автоматическая диагностика и метрологическая аттестация*. В макете ИИС применено оборудование и первичные преобразователи, входящие в реестр государственной системы обеспечения единства измерений Республики Казахстан. Разработанное ПО позволяет проводить статическую и динамическую диагностику оборудования, включающую в себя программный и аппаратный Watchdog контроллеров системы.

– *удобство использования*. Предложенные методы отображения информации (SCADA-система, станции операторов, местные пульты, экран коллективного пользования на базе жидкокристаллического телевизора), за счёт более гибкой структуры и централизации источника информации для локальных пультов операторов и экрана коллективного пользования, предоставляет функциональный инструмент организации экспериментальной информации в различных режимах эксплуатации реакторной установки и позволяет наращивать и модернизировать систему с сохранением базовых принципов эффективности.

### **ВТОРОЙ ЭТАП МОДЕРНИЗАЦИИ ИИС**

На 2016-2017 годы филиалу «Институт атомной энергии» выделены средства в рамках технического сотрудничества с МАГАТЭ. В рамках которого планируется осуществить второй этап модернизации, охватывающий модернизацию ИИС КИПиА и возможную модернизацию ИИС КГО.

ИИС КГО и ИИС КИПиА выполняют функции:

– измерения значений первичных преобразователей СКГО, обработки, отображения и регистрации информации;

– измерения значений первичных преобразователей технологических систем, обработки, отображения и регистрации информации.

ИИС КГО и ИИС КИПиА представляет собой двухуровневый комплекс на базе контроллера промышленного исполнения Controllogix серии 1756 производства фирмы «Rockwell Automation», США. В таблице 1 представлены функциональные задачи ИИС КГО и ИИС КИПиА.

ИИС КГО и ИИС КИПиА реализованы в виде двухуровневых структур (рисунок 9, 10). Верхний уровень ИИС КГО, как и ИИС КИПиА представляет собой АРМ, который обеспечивает прием данных от контроллера нижнего уровня и регистрацию текущих значений измеряемых параметров, обработку и отображение данных, формирование и передачу команд управления на нижний уровень системы.

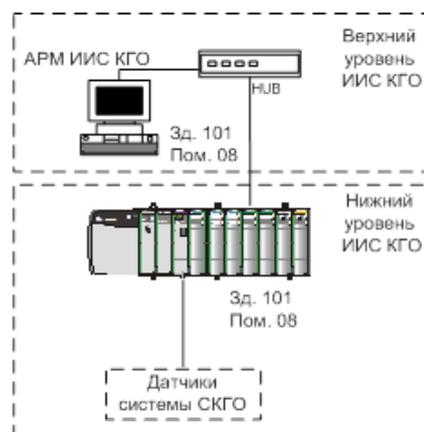


Рисунок 9. Структура ИИС КГО

Таблица 1. Функциональные задачи подсистем

ИИС КГО	ИИС КИПиА
обеспечение сбора и предварительной обработки измерительной информации;	обеспечение сбора и предварительной обработки измерительной информации по всем каналам одновременно на двух независимых контроллерах;
формирование и выдача команд управления вентилем и преобразователем аналоговым БПХ-04П (в составе системы СКГО);	обмен измерительной и служебной информацией с автоматизированным рабочим местом (АРМ) оператора ИИС КИПиА и серверами ИИС ИВГ.1М;
обмен информации с автоматизированным рабочим местом (АРМ) оператора ИИС КГО и серверами ИИС ИВГ.1М	формирование сигналов аварийной защиты по превышению запрограммированных уставок; взаимодействие с системой автоматического управления (САУ) ИВГ.1М в части передачи сигналов аварийной защиты.

С целью повышения надёжности ИИС КИПиА предусмотрено резервирование системы, т.е. контроллер КИПиА имеет резервный контроллер, связанный по сети ControlLogix и в случае выхода из строя первого принимает на себя все функции по работоспособности системы.

Оба уровня подсистем обеспечивают обмен данными между собой, серверами и АРМ операторов ИИС ИВГ.1М.

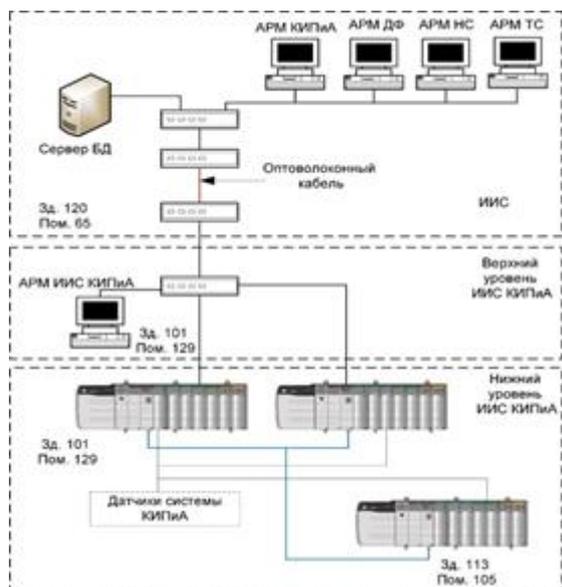


Рисунок 10. Структура ИИС КИПиА

Регистрация сигналов с первичных преобразователей системы КИПиА, формирование сигналов аварийной защиты типа «сухой контакт» и регистрация данных на серверах ИИС осуществляется обоими контроллерами ИИС КИПиА одновременно.

В таблице 2 представлены технические характеристики ИИС КГО и ИИС КИПиА.

С целью разграничения доступа операторов и контроля их действий с ПО предусмотрена авторизация пользователей с помощью имени пользователя и пароля. Авторизация пользователя осуществляется при запуске системы (рисунок 11).

Пройдя авторизацию, открывается экран навигации, который позволяет перейти на мнемосхемы, отображающие данные систем (рисунок 12).

Все мнемосхемы ИИС имеют общую структуру. В верхней части экрана отображается текущие дата и время, режим работы системы, название мнемосхемы и имя текущего оператора. Кроме того, все

мнемосхемы содержат кнопки перехода между мнемосхемами «КИПиА», «САУ», «СУЗ», «СКГО» и «ДК». В нижней части экранов располагается таблица сигналов тревог. При возникновении тревоги, в таблице сигналов тревог начинает мигать сообщение, привлекая внимание оператора. После ознакомления о сигнале тревоги, оператор должен подтвердить, нажатием кнопки «Текущий», при этом мигание строки прекратится. Для более подробной информации о сигнале аварийной защиты (АЗ) оператору необходимо нажать на кнопку «Сообщение», в результате открывается всплывающее окно с информацией о причине АЗ или предупредительной сигнализации (ПС).

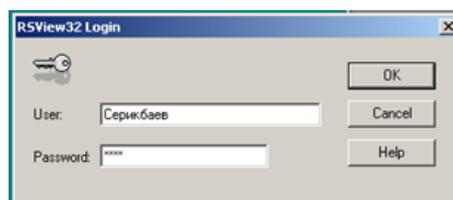


Рисунок 11. Окно авторизации пользователя



Рисунок 12. Экран навигации макета ИИС ИВГ.1М

ПО оператора КГО состоит из двух мнемосхем. На первой мнемосхеме отображаются показатели с блоков преобразования аналоговых БПХ-04П, датчиков УДБН-02Р, датчиков расхода, секция отображения состояния элементов автоматики (положение вентиля) системы СКГО, и секция управления работой ИК. Для более удобного отражения информации для операторов предусмотрено отображение данных системы в виде таблиц.

Таблица 2. Технические характеристики ИИС КГО и ИИС КИПиА

Наименование ИИС	Количество контроллеров	Количество каналов аналогового ввода	Количество каналов дискретного ввода	Количество каналов дискретного вывода	Количество каналов регистрации	Период регистрации на контроллерах, с
КИПиА	2	198	—	7	не менее 400	1; 10
СКГО	1	66	6	3	75	1; 10

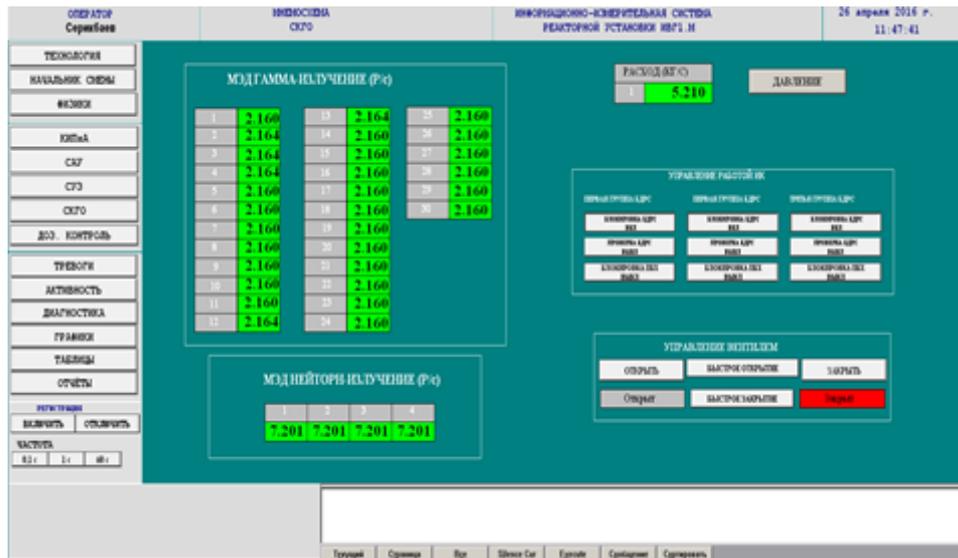


Рисунок 13. Мнемосхема СКГО



Рисунок 14. Мнемосхема СКГО (датчики давления)

Системой предусмотрена предупредительная сигнализация, значение каналов, превысивших верхнее или нижнее значение уставок, ячейка с наименованием канала выделяется красным цветом и мигает, привлекая внимание оператора. Если значение каналов не превышает заданных уставок, то ячейка, на которой отображается физическое значение, выделяется зеленым цветом (рисунок 13).

Все датчики БДРС-01П подключены к блоку преобразования аналоговый БПХ-04П [4], которая производит проверку устройств в блоке декодирования. Для проверки каналов преобразования и блокировки блока декодирования на контакте 28 ЦПУ БПХ-04П должен поступить сигнал напряжением (+24, +12, +6, 0 В). Для выполнения проверки оператору необходимо осуществить нажатие кнопки в секции «Управление работой ИК».

Секция «Управление вентилем» представляет текущее положение вентиля (открыт/закрыт). Открытое положение вентиля отображается красным цветом, закрытое - зеленым.

На рисунке 14 представлена вторая мнемосхема ИИС КГО, которая отображает значения давления в трубах.

Регистрация данных осуществляется на сервер СУБД MSSQL, расположенный на верхнем уровне системы. В нижнем левом углу мнемосхем расположено меню управления периодом регистрации (0, 1 с, 1 с, 60 с).

Представление измерительной информации осуществляется в режиме реального времени. Переключение между экранами отображения, производится командой оператора, нажатием соответствующих кнопок на мнемосхемах курсором мыши.

### Выводы

В результате проделанной работы по второму этапу модернизации ИИС реактора ИВГ.1М, было создано ПО ИИС КГО и ИИС КИПиА, которое:

- позволяет проводить опрос всех каналов измерения систем КГО и КИПиА, предусмотренных проектом;
- производит преобразования значений из измеренного электрического значения канала в его физическое значение;
- осуществляет регистрацию физических и электрических значений на сервер ИИС;
- производит сравнение физических значений с уставками каналов и осуществляет цветовую индикацию при выходе значения за верхнюю или нижнюю уставку;
- отображает значение каналов на мнемосхемах

### Литература

1. Разработка информационно-измерительной системы реакторной установки: отчет о НИР (заключительный) / А.Г. Коровиков, Д.А. Ольховик [и др]. – 2014.– УДК 658.012.011.56:658.512, Инв. № 0112РК02742.
2. Информационно-измерительная система исследовательского реактора ИВГ.1М: технический проект АК.72500.00. – 2010. – Курчатова.
3. Коровиков А.Г., Ольховик Д.А., Первый этап модернизации информационно-измерительной системы исследовательского реактора ИВГ.1М. – Вестник НЯЦ РК, вып. 4, с. 5-12.
4. Блок преобразование аналоговый БПХ-01П: техническое описание и инструкция по эксплуатации:3.036.128 то.- 1988.

## ИВГ.1М РЕАКТОРЫНЫҢ АҚПАРАТТЫҚ-ӨЛШЕУ ЖҮЙЕЛЕРІН ЖАҢАРТУДЫҢ ЕКІНШІ КЕЗЕҢІ

А.Г. Коровиков, В.А. Ермаков, Б.С. Серикбаев

*ҚР ҰАО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатова, Қазақстан*

2010 жылдан бастап Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығы РМК «Атом энергиясы институты» филиалында (бұдан әрі АЭИ филиалы) ИВГ.1М реакторының ақпараттық-өлшеу жүйелерін (АӨЖ) жаңарту жұмыстары жүргізілуде. І кезең аясында 2012 жылдан бастап 2014 жылға дейін автоматты басқару жүйесін (АБЖ), басқыру және қорғаныс жүйесін (БҚЖ) АӨЖ жаңарту бойынша жұмыстары жүргізілді. Жабдықтар, программалық қамтамасыздықтар және материалдар сатылып алынды. Бастапқы түрлендіргіштерден мәліметтерді өңдеу алгоритмдері және пульт операторларына ақпараттар беру экраны жетілдірілді. Жабдықтарды монтаждау орындалды, және іске қосу- реттеу жұмыстары жүргізілді. 2016-2017 жылдарға АЭИ филиалына АТЭХАГмен техникалық қызметтестік аясында қаражат бөлінді. Осының аясында бақылау-өлшеу аспаптары мен автоматикасының (БӨАМА) және қабықтарының герметикалығын бақылау (ҚГБ) АӨЖ жаңартуды қамтитын жаңартудың екінші кезеңін жүзеге асыру жоспарлануда. Осы жұмыстың нәтижесінде БӨАМА және ҚГБ жүйелерінің тәжірибелік ақпараттары көрсетіледі.

## THE SECOND STAGE OF IVG.1M INFORMATION AND MEASURING SYSTEM REFURBISHMENT

A.G. Korovikov, V.A. Yermakov, B.S. Serikbayev

*Institute of Atomic Energy Branch of the RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

Institute of Atomic Energy Branch of the National Nuclear Center has been refurbishing information and measuring system (IMS) of the IVG.1M research reactor since 2010 through the present time. In the frame work of the 1<sup>st</sup> stage from 2012 to 2014 IMS of automatic control system (ACS) and safety control system (SCS) have been already updated. The equipment, software and materials were obtained. Primary converters' data processing algorithms and screens to present the information for the operators were developed. The equipment was dismantled and start-up work was conducted. For 2016-2017 funds were allocated to IAE under technical cooperation with IAEA. Within the framework of this the second stage of updating is planned to realize including IMS of instrumentation and automated control systems (IACS) and casing sealability control (CSC) updating. As a result of this work the following processes are going to be updated: control, recording and experimental data displaying of IACS and CSC.

## ПАМЯТИ ДУЙСЕБАЕВА АЛЬНУРА ДУЙСЕБАЕВИЧА

(13.03.1933 – 05.08.2016)

**5 августа 2016 года в возрасте 83 лет скончался старейший сотрудник Института ядерной физики, профессор, доктор физико-математических наук, лауреат Государственной премии РК Дуйсебаев Альнур Дуйсебаевич.**

Альнур Дуйсебаев родился 13 марта 1933 года в с. Подгорное, Луговского района Джамбульской области. Отец, Бекменбетов Дуйсебай, работал в «ОхотСоюзе», мать, Бекменбетова Мырзагыз, колхозница. После окончания Луговской средней школы в 1952 году поступил на физико-математический факультет Казахского государственного университета им. С.М. Кирова.

Научную деятельность А.Д. Дуйсебаев начал в 1957 г., придя по распределению после окончания КазГУ им. С.М.Кирова, в только что созданный Институт ядерной физики АН КазССР. В связи с тем, что ИЯФ был только организован, под личным контролем Президента АН КазССР, академика К.И. Сатпаева, молодые сотрудники были направлены на стажировки в ведущие научно-исследовательские институты Советского Союза. В их числе был и молодой лаборант Альнур Дуйсебаев. В 1958-1959 гг. он прошел стажировку по ядерной физике и ускорительной технике в Лаборатории измерительных приборов АН СССР (ныне РИЦ «Курчатовский институт») и Всесоюзном институте электрофизической аппаратуры (Ленинград).

В 1961 году, выдержав большой конкурс, Альнур Дуйсебаевич поступил в аспирантуру Физического института им. П.Н. Лебедева АН СССР. Научным руководителем у него был лауреат Нобелевской премии, академик П.А. Черенков. Обучение в аспирантуре ФИАН стало для него огромной школой не только в плане овладения специальностью, но и в определении жизненных ориентиров, которым он, не отступая, следовал всю свою жизнь, и в становлении которых большую роль сыграл Павел Алексеевич Черенков. За время обучения в аспирантуре А.Д. Дуйсебаев выполнил цикл работ, посвященных фоторасщеплению легких ядер фотонами высоких энергий. Результаты этих работ вошли в его кандидатскую диссертацию, которая была им успешно защищена в 1967 году.

По окончании аспирантуры, несмотря на предложения остаться работать в ФИАНе, Альнур Дуйсебаевич вернулся в ИЯФ. Поворотным моментом в его судьбе стала встреча с Президентом АН КазССР, академиком Ш. Есеновым, который предложил ему образовать и возглавить лабораторию, в задачи которой входили экспериментальные исследования



ядерно-физических процессов на базе только что переведенного в изохронный режим работы циклотрона У-150М. В 1972 году Постановлением Президиума АН КазССР была создана лаборатория ядерных процессов, которую профессор А.Д. Дуйсебаев возглавлял более 40 лет. В сжатые сроки им был сформирован научный коллектив и развернуты ядерно-физические исследования на уровне ведущих ядерных центров страны.

Научная деятельность А.Д. Дуйсебаева связана с изучением механизмов взаимодействия частиц и ядер с ядрами. Им выполнен цикл оригинальных работ по упругому и квазиупругому рассеянию, реакциям нуклидов водорода и гелия с ядрами. В результате проведенных исследований ему с сотрудниками удалось обнаружить несколько оригинальных ядерных эффектов: эффект «аномального» и «радужного» рассеяния, пороговые явления и селективное возбуждение многочастичных состояний с большим угловым моментом.

Другой областью его интересов являлось исследование предравновесного механизма в ядерных реакциях, отвечающего за динамику перехода возбужденной составной системы в равновесное состояние. А.Д. Дуйсебаевым с коллегами получены обширные экспериментальные данные по дважды-дифференциальным сечениям реакций с нуклидами водорода и гелия. Эти данные внесены в банк ядерных констант МАГАТЭ и находят применение при конструировании гибридных ядерно-энергетических установок, в космической технике и ядерной медицине.

Результаты этих исследований вошли в его докторскую диссертацию «Квазиупругие и предравновесные процессы в реакциях с ядрами гелия средних энергий», которую он успешно защитил в МГУ им. М.И. Ломоносова, 3 августа 1990 года ему была присуждена ученая степень доктора физико-математических наук.

А.Д. Дуйсебаев являлся разработчиком и научным руководителем Программы фундаментальных исследований МОН РК «Исследовать структуру ядер и механизмы ядерных реакций» и входящей в нее темы «Исследование кластерных аспектов структуры ядер и механизма взаимодействия нуклидов водорода и гелия с ядрами при низких и средних энергиях», а также двух проектов по грантовому финансированию.

Особое место в его исследованиях отводится теме «Экспериментальное определение инклюзивных сечений реакций инициированных протонами на ядрах-материалах топливных и конструкционных элементов гибридных ядерно-энергетических установок» Республиканской целевой научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Казахстане».

А.Д. Дуйсебаев автор более 300 научных публикаций, в том числе и в таких рейтинговых физических изданиях мира, как *Physical Review C*, *Nuclear Physics A*, Письма в ЖЭТФ, Ядерная физика, Приборы и техника эксперимента и др. По руководимой им научной тематике защищены четыре докторские и 14 кандидатских диссертаций.

Другой важной составляющей частью деятельности Альнура Дуйсебаевича была преподавательская деятельность. На протяжении многих лет он читал курсы в Казахском Национальном университете им. аль-Фараби, Евразийском Национальном университете им. Л.Н. Гумилева. Им были разработаны учебные программы: «Механизм ядерных реакций», «Фундаментальные проблемы ядерной физики», «Ускорители заряженных частиц и их применение», «Физика тяжелых ионов». Под его руководством прошли специальный практикум и подготовили к защите дипломы и диссертации более 50 студентов.

А.Д. Дуйсебаев отмечен медалью «Ветеран труда СССР», Золотым знаком «Заслуженный работник атомной отрасли РК I степени». В 2009 году ему была присуждена государственная премия РК в области науки и техники.

Альнур Дуйсебаевич был увлеченным учёным. Многие запомнят его отзывчивым человеком, авторитетным учёным и интересным, интеллигентным собеседником, учителем и коллегой. Он будет продолжать жить в своих трудах, в памяти тех, кто когда-либо общался с ним.

*Н. Буртебаев, В. Джазайров-Кахраманов,  
Т.К. Жолдыбаев, Ф.М. Пеньков, Е.Т. Ибраева,  
Б.А. Дуйсебаев, Т.Н. Квочкина, Н.Н. Павлова,  
В.С. Жданов, Б. Садыков*

## СПИСОК АВТОРОВ

- Азаматов З.Т., 59  
Акаев А.С., 134  
Алейников Ю.В., 113  
Ан В.А., 30  
Байгожина А.А., 71  
Бакланов В.В., 120, 128  
Витюк В.А., 77  
Витюк Г.А., 77  
Волошин Н.П., 23  
Гановичев Д.А., 134  
Горин Н.В., 23  
Диков А.С., 51  
Дуйсебаев А., 17  
Дуйсебаев Б.А., 17  
Ермаков В.А., 140  
Жагипарова Л.К., 85  
Жамбаева М.К., 128  
Жанболатов О.М., 77  
Жолдыбаев Т.К., 17  
Жумадилова У.А., 94  
Зуев В.А., 120, 134  
Иданова Д.С., 98  
Иркимбеков Р.А., 71  
Исмаилов К.М., 17  
Каазик П.Б., 30  
Кадыржанов К.К., 65  
Казамбаева А., 17  
Кайканов М.И., 59  
Канюков Е., 65  
Кислицин С.Б., 51  
Кожамбетов Е.А., 120  
Козловский А., 65  
Копничев Ю.Ф., 36, 43  
Корнеев А.А., 23  
Коровиков А.Г., 140  
Котов В.М., 77, 98  
Коянбаев Е.Т., 120  
Кукушкин И.М., 120  
Кулагин И.А., 59  
Курбанбеков Ш.Р., 128  
Кусаинов А.Т., 105  
Ларионов А.С., 51  
Липилина Е.Н., 23  
Максимкин О.П., 5  
Медетбеков Б.С., 113  
Миниязов А.Ж., 120  
Мурзагалиева А.А., 71  
Мухамедова Н.М., 128  
Надинов И.У., 59  
Насурлла М., 17  
Пахниц А.В., 85  
Попов Ю.А., 113  
Прозорова И.В., 94  
Простаков В.И., 23  
Рамазанова К.М., 134  
Редкоречев В.И., 59  
Садыков Б.М., 17  
Сапатаев Е.Е., 120  
Сейтмагамбет Г., 65  
Серикбаев Б.С., 140  
Скаков М.К., 23, 120, 128  
Соколова И.Н., 36, 43  
Стародумова И.Г., 23  
Тарасенко Е.В., 105  
Уразбаев А.О., 59  
Уралов М.К., 51  
Хажидинов А.С., 134  
Хасенов М.У., 59  
Цай К.В., 5  
Челюбеева Т.В., 30  
Чернядьев В.В., 23  
Чуриков Ю.И., 23  
Шаповалов Г.В., 105  
Шлимас Д., 65  
Шмаков Д.В., 23  
Шумская Е., 65



---

## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи предоставляются в электронном виде (на CD, DVD 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 подписочных подписей.

Текст печатается через одинарный межстрочный 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 аннотация к статье на русском языке, ключевые слова и основной текст. В конце статьи, после списка литературы, повторяются блоки «название, авторы, организации, аннотация, ключевые слова» на казахском и английском языке.

Максимально допустимый объем статьи – 10 страниц.

### **При написании статей необходимо придерживаться следующих требований:**

- Статья должна содержать аннотации на казахском, английском и русском языках (130-150 слов) с указанием ключевых слов, названия статьи, фамилии, имени, отчества авторов и полного названия организации, города и страны местонахождения, которую они представляют;
- Ссылки на литературные источники даются в тексте статьи цифрами в квадратных [1] скобках по мере упоминания. Список литературы следует привести по ГОСТ 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, \*.jpg, \*.wmf 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:**

- 2 рецензии высококвалифицированных специалистов (докторов наук) в соответствующей отрасли науки;
- выписка из протокола заседания кафедры или методического совета с рекомендацией к печати;
- акт экспертизы (экспертное заключение);
- сведения об авторах (в бумажном и электронном виде): ФИО (полностью), наименование организации и ее полный адрес, должность, ученая степень, телефон, e-mail.

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, электронной почты.

Статьи, оформление которых не соответствует указанным требованиям, к публикации не допускаются.

---

---

**Ответственный секретарь** к.ф.-м.н. У.П. Козтаева  
тел. (722-51) 2-33-35, E-mail: KOZTAEVA@NNC.KZ

**Технический редактор** И.Г. Перепелкин  
тел. (722-51) 2-33-33, E-mail: IGOR@NNC.KZ

---

**Адрес редакции:** 071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 2, зд. 054Б  
<http://www.nnc.kz/vestnik>

---

© Редакция сборника «Вестник НЯЦ РК», 2015

---

**Регистрационное свидетельство №1203-Ж от 15.04.2000 г.**  
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. Красноармейская, 2, зд. 054Б

