

ISSN 1729-7516

## **Вестник НЯЦ РК**

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 2(38), ИЮНЬ 2009

*Издается с января 2000 г.*

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

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

## **ҚР ҰЯО Жаршысы**

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ  
МЕРЗІМДІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛЫ

2(38) ШЫҒАРЫМ, МАУСЫМ, 2009 ЖЫЛ

## **NNC RK Bulletin**

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

ISSUE 2(38), JUNE 2009

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

В журнале содержатся доклады, представленные на IX ежегодной конференции-конкурсе НИОКР молодых ученых и специалистов РГП НЯЦ РК (13 - 15 мая 2009 г., Курчатов, Казахстан). Было представлено 36 работ. Из них фундаментальных – 5, прикладных – 24, инженерно-технических – 6.

**Первое место присуждено:**

**ЗАЗУЛИНУ Денису Михайловичу** – старшему научному сотруднику лаборатории низкоэнергетических ядерных реакций научного отдела ядерной физики ДГП ИЯФ НЯЦ РК.

**Второе место присуждено:**

**ТОКТОГУЛОВОЙ Диане Асылбековне** – младшему научному сотруднику лаборатории радиационного материаловедения ДГП ИЯФ НЯЦ РК.

**ЛАРИОНОВОЙ Наталье Владимировне** – руководителю группы радиозоологических исследований, отдела комплексных исследований экосистем ДГП ИРБЭ НЯЦ.

**Третье место присуждено:**

**ЖАКАНБАЕВУ Елдару Асхатовичу** – инженеру лаборатории ионно-плазменных технологий ДГП ИЯФ НЯЦ РК.

**КУРПЕШЕВОЙ Анаре Мустапаевне** – начальнику группы лаборатории испытаний реакторного топлива ДГП ИАЭ НЯЦ РК.

**УЗБЕКОВУ Абылаю Нурсарсеновичу** – инженеру Центра сбора и обработки специальной сейсмической информации ДГП ИГИ НЯЦ РК.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО РЕАКЦИИ <math>{}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}</math> ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИ ЭНЕРГИЯХ <math>E_{p,\text{лаб.}} = 387 - 1283</math> кэВ.....</b>	<b>5</b>
Зазулин Д.М., Керимкулов Ж.К.	
<b>ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ОБЛУЧЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.....</b>	<b>11</b>
Максимкин О.П., Гусев М.Н., Токтогулова Д.А.	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСТЕНИЙ В КАЧЕСТВЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОДЕРЖАНИЯ ЗН В ГРУНТОВЫХ ВОДАХ.....</b>	<b>18</b>
Ларионова Н.В., Лукашенко С.Н., Субботин С.Б., Ляхова О.Н., Айдарханов А.О., Бахтин Л.В.	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАГНЕТРОННОГО ОСАЖДЕНИЯ НА СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА НИТРИДА НИОБИЯ .....</b>	<b>26</b>
Тулеушев Ю.Ж., Жаканбаев Е.А.	
<b>ИЗМЕНЕНИЕ ВО ВРЕМЕНИ ТРЕХМЕРНОГО НЕЙТРОННОГО ПОЛЯ РЕАКТОРА ИГР .....</b>	<b>30</b>
Котов В.М., Курпешева А.М.	
<b>ИСТОРИЧЕСКИЕ СЕЙСМОГРАММЫ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ ДЛЯ РАЗВИТИЯ НОВЫХ ПОДХОДОВ В РАСПОЗНАВАНИИ .....</b>	<b>33</b>
Узбеков А.Н., Соколова И.Н.	
<b>НЕСФЕРИЧНОСТЬ АТОМНЫХ ЯДЕР, ИЗМЕРЕННАЯ МЕТОДОМ ФРЕНЕЛЕВСКОЙ ДИФРАКЦИИ ИОНОВ .....</b>	<b>38</b>
Дьячков В.В., Юшков А.В., Алексеенко Г.Г.	
<b>АНТИКОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА НИТРИДОВ, АЛЮМИНИДОВ, БЕРИЛЛИДОВ ТИТАНА И КОМБИНИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ.....</b>	<b>44</b>
Поляков А.Н., Поддубная Е.В., Антонюк В.И., Иманбеков Ж.Ж.	
<b>УЧЕТ ГЛУБИНЫ ПРОНИКНОВЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ПУЧКА ПРИ РЕНТГЕНОФАЗОВОМ АНАЛИЗЕ ОБРАЗЦОВ ТОНКОСЛОЙНЫХ СИСТЕМ .....</b>	<b>50</b>
Поддубная Е.В., Поляков А.Н., Слюсарев А.П., Иманбеков Ж.Ж.	
<b>ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ ТОКАМАКА КТМ.....</b>	<b>57</b>
Колокольцов М.В., Шаповалов Г.В., Коровиков А.Г., Чудинова М.В., Шипилов П.В., Макаров Д.А., Кретинин А.А., Шипилов Д.В.	
<b>ГЕНЕРАТОР ОТЧЕТОВ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ ТОКАМАКА КТМ .....</b>	<b>63</b>
Чудинова М.В., Колокольцов М.В., Кретинин А.А., Макаров Д.А.	
<b>ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ВАКУУМНОГО СТЕНДА.....</b>	<b>68</b>
Ольховик Д.А., Шипилов П.В., Коровиков А.Г., Чихрай Е.В.	
<b>ГАЗООХЛАЖДАЕМЫЙ РЕАКТОР С ВЫСОКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ .....</b>	<b>73</b>
Котов В.М., Иркимбеков Р.А., Витюк Г.А.	
<b>МАКЕТ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ.....</b>	<b>77</b>
Ақылбек Н.М., Ахметов К.М., Алдияров Н.У., Бекен Р.Е.	
<b>УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ ЦИКЛОТРОНА ДЦ-60 В г. АСТАНА. ПОЛУЧЕНИЕ УСКОРЕННЫХ ПУЧКОВ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ И ПЕРВЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ .....</b>	<b>80</b>
Горлачев И.Д., Глущенко Н.В., Князев Б.Б., Лысучин С.Н., Платов А.В.	
<b>МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ ПЕРСПЕКТИВНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ВВЭР .....</b>	<b>86</b>
Свинухов Д.С., Жданов В.С., Бакланов В.В., Саблук В.В.	

---

<b>КАЛИБРОВКА ДВОЙНОГО МНОГОПРОВОЛОЧНОГО ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТОКАМАКА КТМ</b> .....	93
Кириленко А.В.	
<b>ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ, ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОННОГО И ПЛАЗМЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА</b> .....	96
Диков А.С., Ермаков Е.Л., Кислицин С.Б., Полтавцева В.П.	
<b>ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ОБЛУЧЕННЫХ И НЕОБЛУЧЕННЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА И АЛЮМИНИЯ МЕТОДОМ РЕНГЕНОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА</b> .....	101
Алдабергенова Т.М., Слюсарев А.П., Коспанов Н., Кислицин С.Б.	
<b>СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РЕАКТОРА ВВР-К</b> .....	107
Шаймерденов А.А.	
<b>СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ДАННЫХ В ЦЕНТРЕ СБОРА И ОБРАБОТКИ СПЕЦИАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ</b> .....	113
Сейнасинов Н.А., Гордиенко Д.Д.	
<b>ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЯТЦ ДЛЯ РАЗВИТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ</b> .....	119
Кукушкин С.М., Мукенева С.А., Тур Е.С., Цынгаев В.М.	
<b>ПРИМЕНЕНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАЗРЕЗОВ</b> .....	128
Перепёлкин А.И., Баранов С.А.	
<b>ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ЛУГОВЫХ ПОЧВАХ ЭКОСИСТЕМЫ ШТОЛЬНИ № 176 ПЛОЩАДКИ «ДЕГЕЛЕН»</b> .....	136
Кабдыракова А.М., Ларионова Н.В., Лукашенко С.Н., Магашева Р.Ю.	
<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМАТРОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ</b> .....	143
Дядов С.И., Зуев В.А., Игнашев В.И., Микиша А.В.	
<b>РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЗАЩИТНОГО МАТЕРИАЛА ПЕРВОЙ СТЕНКИ ИТЭР НА УСТАНОВКЕ ГСЭП-3</b> .....	149
Бакланов В.В., Дерявко И.И., Кукушкин И.М., Тарасенко Е.В.	
<b>ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННОГО РАЗОГРЕВА МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В РЕАКТОРОСТРОЕНИИ</b> .....	158
Кенжин Е.А., Избасханова А.Т.	
<b>РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ БАЗЫ ДАННЫХ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ЗНАЧЕНИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ИИС ИВГ-1 М</b> .....	164
Уханов С.В.	
<b>РЕГИСТРАЦИЯ И ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ МИКРОСЕЙСМ И МИКРОБАРОМ ПО ДАННЫМ СЕТИ СТАНЦИЙ НЯЦ РК</b> .....	172
Дубровин В.И., Смирнов А.А.	
<b>СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА ПО ДАННЫМ СТАНЦИЙ НЯЦ РК</b> .....	178
Захарова О.В., Комаров И.И.	
<b>К ВОПРОСУ УЧЕТА ТЕХНОГЕННЫХ РАДИАЦИОННЫХ РИСКОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ</b> .....	182
Артемова В.А., Кабдрахимова Г.Д., Полешко А.Н.	
<b>ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК ЖИТЕЛЕЙ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ, НАХОДЯЩИХСЯ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ УРАНОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ</b> .....	187
Кабдрахимова Г.Д., Артемова В.А., Полешко А.Н.	

---



УДК 539.14,539.17

## НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО РЕАКЦИИ ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$ ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИ ЭНЕРГИЯХ $E_{p, \text{лаб.}} = 387 - 1283$ кэВ

Зазулин Д.М., Керимкулов Ж.К.

Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан

Измерены угловые распределения  $\gamma$ -квантов  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$  реакции под углами  $\theta_{p, \text{лаб.}} = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  и  $135^\circ$  при энергиях  $E_{p, \text{лаб.}} = 387, 690, 984$  и  $1283$  кэВ для переходов на основное и первое возбужденное состояния ядра  ${}^7\text{Be}$ . Для этих переходов найдены коэффициенты разложения. Определены коэффициенты ветвления, интегральные и полные функции возбуждения. Проведено сравнение полученных результатов с имеющимися данными.

### ВВЕДЕНИЕ

Актуальной проблемой ядерной астрофизики является объяснение распространенности легких элементов ( $Li, Be, B$ ) во Вселенной. Они не могут нарабатываться в звездах в обычных реакциях нуклеосинтеза, так как интенсивно разрушаются в реакциях  $(p,\gamma)$  и  $(p,\alpha)$  уже при сравнительно низких температурах  $(2 - 5) \cdot 10^6$  К. В этих условиях, как показывают расчеты, содержание изотопов  $Li, Be, B$  должно составлять  $\leq 10^{-13}$  по отношению к водороду. Наблюдаемые же распространенности оказываются почти на 2 – 3 порядка выше. Прямые измерения сечений ядерных реакций  $(p,\gamma)$ ,  $(\alpha,\gamma)$  и т.д. на легчайших ядрах, проходящих при очень низких энергиях, соответствующих  $T \sim 10^7$  К дают возможность проверить различные варианты астрофизических теорий наблюдаемой распространенности химических элементов. Более того, реакции с участием изотопа  ${}^6\text{Li}$  имеют значительный интерес в области перспективной термоядерной энергетики. Так, реакция радиационного захвата  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$  несет информацию о количестве  ${}^6\text{Li}$  и динамике его горения.

Надежность теоретических моделей  $(p,\gamma)$  – реакций на легких ядрах определяется, в том числе, тем насколько хорошо эти модели описывают поведение сечений в области энергий  $E_{p, \text{лаб.}} = 200 - 1500$  кэВ где одновременно идут прямые и резонансные процессы [1]. В этой области наиболее широко реакция  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$  изучалась в работах [2-4]. В работе [2] проведено измерение углового распределения гамма-квантов при  $E_{p, \text{лаб.}} = 800$  кэВ. Был получен результат  $dW/d\Omega = 1 + (1.05 \pm 0.15) \cos^2\theta$ . В работе [3] измерены дифференциальные сечения радиационного захвата на основное и первое возбужденное состояния ядра  ${}^7\text{Be}$  для угла  $0^\circ$ . Интегральные и полные сечения реакции  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$  в работе [3] определялись с использованием углового распределения [2], при этом предполагалось, что оно постоянно для всех энергий. В работе [4] погрешность в значениях полных сечений составляет 20%. Существенное расхождение данных [3, 4] и большие погрешности не удовлетворяют требованиям современных теоретических работ.

Поэтому целью настоящего исследования являлось детальное экспериментальное изучение угловых распределений реакции  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$  при энергиях  $E_{p, \text{лаб.}} = 387 - 1283$  кэВ, чтобы в дальнейшем получить дифференциальные и полные сечения в указанной области энергий с погрешностью не более 10%.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В проведенных экспериментах использовалась специально изготовленная камера (рисунок 1), с индиевыми вакуумными уплотнителями, системами тонкой юстировки и визуального контроля формы пучка протонов и его положения на мишени в течении всего измерения, с возможностью прецизионного размещения мишени точно по центру и дооснащения камеры азотной ловушкой и дополнительным магнито-разрядным насосом. Новая камера реакций, которая по многим параметрам аналогична камере описанной в работах [1,5,6], присоединялась к выходному фланцу центральной камеры рассеяния, укомплектованной турбомолекулярным и магнито-разрядным насосами и системой азотных ловушек. Типичное давление в камере реакций составляло  $1.5 \cdot 10^{-6}$  мм.рт.ст., а экспериментальная погрешность, обусловленная образованием углеродного нагара на мишени в течение измерения, была пренебрежимо мала.

В качестве мишеней в экспериментах использовались тонкие пленки стабильных термостойких соединений  $Li_2O$  и  $LiOH$  (с толщинами  $\approx 30$  мкг/см<sup>2</sup> и с изотопным обогащением по  ${}^6\text{Li} > 90\%$ ), напыленные на медные подложки (с толщинами  $\approx 2$  мм).

Для определения относительной эффективности  $\gamma$ -детектора из сверхчистого германия (HrGe) в области энергий  $\gamma$ -квантов от 344 до 3200 кэВ в работе использовались точечные радиоактивные источники  ${}^{152}\text{Eu}$  ( $T_{1/2} = 12$  лет) и  ${}^{56}\text{Co}$  ( $T_{1/2} = 77$  дней), относительные интенсивности  $\gamma$ -переходов которых известны с погрешностью не более 1% [5-7]. Источник  ${}^{56}\text{Co}$  был изготовлен на циклотроне ИЯФ НЯЦ РК путем облучения железной фольги протонами с энергией  $E_{p, \text{лаб.}} = 30$  МэВ (реакция  ${}^{56}\text{Fe}(p,n){}^{56}\text{Co}$ ) в течении 2 часов при токе пучка 1 мкА. После выдержки облученной фольги в течение 1 месяца для распада мешающих короткоживущих изотопов, образующихся в реакциях на примесях и других побочных реакциях, источник стал достаточно чистым.

Эффективность  $\gamma$ -детектора для энергетической области выше 3.2 МэВ определялась с помощью реакции  ${}^{27}\text{Al}(p,\gamma){}^{28}\text{Si}$  при резонансной энергии протонов  $E_{p,\text{лаб.}} = 992$  кэВ. В результате этой реакции высвечиваются  $\gamma$ -линии в интервале энергий 1.8-10.8 МэВ, относительные интенсивности и угловые распределения которых известны с погрешностью не более 5% (для основных переходов) [8]. В настоящей работе были использованы переходы реакции  ${}^{27}\text{Al}(p,\gamma){}^{28}\text{Si}$  при  $E_{p,\text{лаб.}} = 992$  кэВ со следующими энергиями: 1522, 1779, 2839, 4497.6, 4743, 6020, 7931 и 10763 кэВ.

Во время определения относительной эффективности детектор и источники располагались точно в геометрии эксперимента. Кривые относительной эффективности от источников  ${}^{152}\text{Eu}$ ,  ${}^{56}\text{Co}$  и реакции  ${}^{27}\text{Al}(p,\gamma){}^{28}\text{Si}$  при  $E_{p,\text{лаб.}} = 992$  кэВ строились с использованием новой камеры реакций для углов  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,

$90^\circ$  и  $135^\circ$  к направлению пучка протонов. При этом статистическая ошибка в определении площади каждого пика-перехода не превышала 3%, кроме линий: 1360.22 кэВ источника  ${}^{56}\text{Co}$ , 6020 и 7931 кэВ реакции  ${}^{27}\text{Al}(p,\gamma){}^{28}\text{Si}$  ( $\approx 3.5$ , 3.2 и 6.3% соответственно). Мертвое время АЦП не превышало 2%.

В работе стабильность толщины облучаемой мишени, а также положение пучка на мишени контролировались в течении всего измерения путем построения зависимости количества зарегистрированных гамма-квантов реакции  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$  от текущего показания на интеграторе. Измерение считалось корректным, когда зависимость  $N_\gamma$  от  $N_p$  представляла собой прямую линию в пределах удвоенной текущей статистической погрешности определения  $N_\gamma$  (т.е. все точки попадали в 95% доверительный интервал).

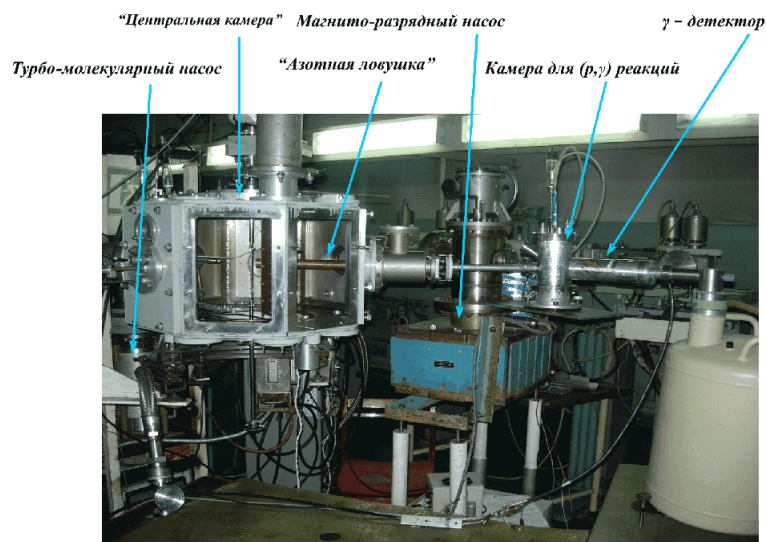


Рисунок 1. Вид экспериментальной установки для изучения процессов радиационного захвата

Для предотвращения перегрузки электроники, обусловленной мощной фоновой линией с энергией  $E_\gamma = 478$  кэВ (процессы  ${}^7\text{Li}(p,p'\gamma){}^7\text{Li}$  и  ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li}^* + \beta^+ + \nu \rightarrow {}^7\text{Li} + 478$  кэВ), между детектором и областью реакции была помещена плоская свинцовая пластина толщиной 1 см. При этом интенсивность линии с  $E_\gamma = 478$  кэВ уменьшалась примерно в 5 раз в то время как интенсивность линий от реакции  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$  (с  $E_\gamma > 6000$  кэВ) уменьшалась только на несколько процентов.

В эксперименте  $\gamma$ -детектор располагался на расстоянии 6 см от области локализации реакции. Детектор и калибровочные источники располагались с погрешностью до 1 мм. С помощью источника  ${}^{137}\text{Cs}$  (661.66 кэВ) была найдена зависимость скорости регистрации гамма-квантов от расстояния источник-детектор. Было определено что на расстоянии 6 см отклонение на  $\pm 1$  мм приводит к изменению скорости регистрации на  $\pm 3.2\%$ . Таким образом общая ошибка в определении относительной

эффективности детектора с учетом статистической погрешности в определении отсчетов в пиках  $\gamma$ -переходов, мертвого времени измерительной аппаратуры и погрешности, вносимой неточностью расположения детектора, составляла 5.5% на всем интервале энергий регистрируемых  $\gamma$ -квантов от 344 до 10763 кэВ.

Полученные угловые распределения  $\gamma$ -лучей аппроксимировались полиномами Лежандра [9]:

$$dW/d\Omega = 1 + \sum_k a_k Q_k P_k(\cos\theta) \quad (k = 1, 2, \dots),$$

где  $a_k$  – коэффициенты разложения и  $Q_k$  – сглаживающие коэффициенты, учитывающие телесный угол, стягиваемый  $\gamma$ -детектором.

Ввиду небольшого количества углов, под которыми проводились измерения, аппроксимация включала только полиномы с  $k = 1$  и 2.

Величины  $Q_k$  рассчитывались для конфигурации эксперимента, в приближении точечного источника с учетом известных размеров чувствительной облас-

ти  $\gamma$ -детектора, а также расстояния между детектором и источником ( $D$ ). Расчеты были проведены без учета плоской свинцовой пластины (которая, как нетрудно понять, несколько уменьшает эффект сглаживания) помещенной между детектором и областью реакции.

При этом [5, 6, 10]:

$$Q_i = \frac{J_i}{J_0} \quad (i = 1, 2),$$

где

$$J_k = \sum_{i=0}^3 \int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} P_k(\cos \alpha) \cdot [1 - e^{-\mu(E_\gamma) \cdot l_{i+1}(\alpha)}] \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha$$

$$(k = 0, 1, 2),$$

$\mu(E_\gamma)$  – коэффициент относительного поглощения.

Величины  $l_i(\alpha)$ , а также пределы интегрирования  $\theta_i$  определялись геометрией эксперимента.

Коэффициент  $\mu(E_\gamma)$  был найден для энергии 661.66 кэВ путем сравнения экспериментальной зависимости скорости регистрации  $\gamma$ -квантов от расстояния между источником ( ${}^{137}\text{Cs}$ ) и детектором с зависимостью, рассчитанной с помощью выражения для  $J_0$ . При этом была проведена коррекция геометрических размеров детектора. Затем с уточненными размерами и с помощью кривой относительной эффективности для фото-пика была построена энергетическая зависимость  $\mu(E_\gamma)$ .

Далее были рассчитаны величины  $J_0(D)$  для  $D = 10 - 300$  мм и диапазона энергий  $\gamma$ -квантов от 661.66 до 8500 кэВ, представляющего интерес в настоящей работе.

На следующем этапе рассчитывались величины  $Q_1(D)$  и  $Q_2(D)$  для того же диапазона  $D$  и энергий  $\gamma$ -квантов. Было обнаружено что  $Q_1(D)$  и  $Q_2(D)$  практически не зависят от энергии  $\gamma$ -квантов и с увеличением  $D$  стремятся к 1.

Наконец при  $D = 6$  см. были рассчитаны значения  $Q_1(E_\gamma)$  и  $Q_2(E_\gamma)$ . Было найдено, что  $Q_1$  и  $Q_2$  постоянны в диапазоне энергий  $E_\gamma = 661.66 - 8500$  кэВ.

Все расчеты, приведенные выше, были проведены численно в среде программирования Borland C++ 5.02. Непосредственно после измерений всех гамма-спектров от реакции  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$  была выполнена калибровка ускорителя УКП-2-1 (подробное описание ускорителя дано в работе [11]) по энергии с использованием узких резонансов реакции  ${}^{27}\text{Al}(p,\gamma){}^{28}\text{Si}$  при  $E_{p,\text{лаб.}} = 992$  кэВ и реакции  ${}^{19}\text{F}(p,\alpha\gamma){}^{16}\text{O}$  при  $E_{p,\text{лаб.}} = 340$  кэВ [12, 13]. Точность калибровки составила  $\pm 1$  кэВ, разброс энергий протонов в пучке ускорителя был 1.2 кэВ. С учетом новой энергетической калибровки УКП-2-1 и потерь энергий протонов в мишенях скорректированы эффективные лабораторные энергии, при которых были проведены измерения.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПРОЦЕССА ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$ ПРИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ

В настоящей работе были проведены измерения угловых распределений гамма-квантов от реакции  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$  для переходов на основное состояние и на уровень  $1/2^-$  (429 кэВ) ядра  ${}^7\text{Be}$  при энергиях налетающих протонов 387, 690, 984 и 1283 кэВ.

Токи пучка протонов, падающих на мишени, были в пределах 5 - 8 мкА. При измерении интегрального тока собранный заряд составлял от 0.05 до 0.25 Кулон. Мишени располагались в камере для изучения  $(p,\gamma)$ -реакций (рисунок 1).

На рисунке 2 показан пример  $\gamma$ -спектра, полученного при  $E_{p,\text{лаб.}} = 984$  кэВ,  $\theta_{\gamma,\text{лаб.}} = 0^\circ$ . На рисунке хорошо видны фоновые линии 1461 кэВ ( ${}^{40}\text{K}$ ) и 2614 кэВ ( $\text{RdTh}$ ), линия 478 кэВ и аннигиляционная линия с  $E_\gamma = 511$  кэВ. Хорошо известные энергии  $\gamma$ -переходов для этих линий позволяли контролировать энергетическую калибровку при наборе каждого спектра. Пики полного поглощения и пики одинарной и двойной утечек для  $\gamma$ -переходов на основное и первое возбужденное состояния ядра  ${}^7\text{Be}$  также хорошо видны на рисунке.

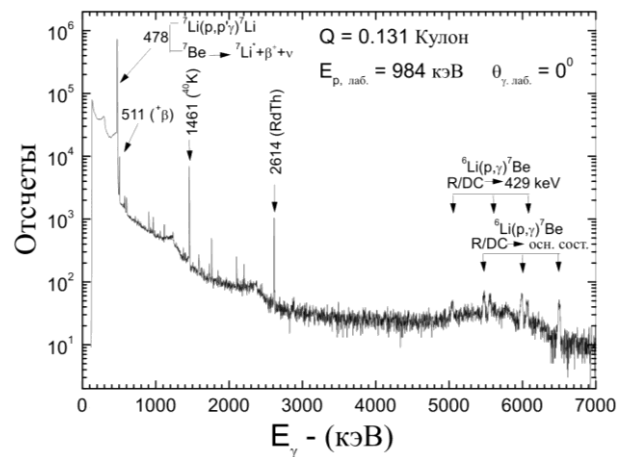


Рисунок 2. Пример  $\gamma$ -спектра реакции  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$  полученного при энергии налетающих протонов 984 кэВ ( $\theta_{\gamma,\text{лаб.}} = 0^\circ$ ) с использованием  $\text{HrGe GEM20P}$  детектора объемом  $111 \text{ см}^3$ , расположенного в 6 см от области реакции

Под выходом реакции  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$  принималась сумма отсчетов в спектральном пике с предварительно вычтенным фоном, взятым линейно в форме трапеции. Для каждого измеренного спектра были извлечены выходы пиков полного поглощения и пиков одинарной утечки для гамма-переходов на основное и первое возбужденное ( $1/2^-$ , 429 keV) состояния ядра  ${}^7\text{Be}$ . Статистическая погрешность в определении выходов (включающая погрешность, вносимую вычитаемым фоном) была меньше 10 % (15 %) для пиков полного поглощения (одинарной утечки) для гамма-переходов на основное и первое

возбужденное ( $1/2^-, 429$  keV) состояния ядра  ${}^7\text{Be}$  при всех энергиях налетающих протонов.

Выходы от гамма-переходов на основное и первое возбужденное состояния были использованы при определении коэффициентов ветвления для этих переходов. Найдены следующие значения коэффициентов -  $(65 \pm 3)\%$  и  $(35 \pm 3)\%$  для переходов на основное и на первое возбужденное состояния соответственно. В пределах экспериментальной погрешности эти коэффициенты оказались постоянны во всем диапазоне энергий проведенных измерений. Полученные коэффициенты согласуются со значениями  $(63.4 \pm 1.9)\%$  и  $(36.6 \pm 1.9)\%$ , найденными в работе [14], с данными 0.60 и 0.4 из работы [15], с данными  $(59 \pm 3)\%$  и  $(41 \pm 3)\%$  из [3] и со значениями 62% и 38% найденными в [16].

Подогнанные угловые распределения и полученные коэффициенты разложения  $a_1$  и  $a_2$  для  $\gamma$ -переходов на основное и первое возбужденное состояния ( $1/2^-, 429$  keV) ядра  ${}^7\text{Be}$  показаны на рисунке 3 и таблице 1 соответственно. Для геометрии проведенного эксперимента было обнаружено, что результаты вычислений интегральных выходов реакции  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$ , проведенных с учетом сглаживающих

коэффициентов  $Q_1$  и  $Q_2$  отличаются от результатов аналогичных вычислений, проведенных без учета  $Q_1$  и  $Q_2$ , не более чем на 1% для всех энергий выполненных измерений. Также из рисунка 3 и таблицы 1 видно, что в диапазоне  $E_{p,\text{лаб.}} = 387 - 1283$  кэВ угловые распределения гамма-квантов не постоянны. Более того, они значительно отличаются от данных работы [2]. В результате чего, интегральные сечения, полученные в работе [3], в которой использовалось угловое распределение из [2] могут быть занижены на (10 – 17)% (см. 4-ый столбец таблицы 1). С другой стороны ход кривой полных сечений реакции  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$  полученных в настоящем эксперименте и показанный на рисунке 4 оказался в хорошем согласии с результатами предыдущих измерений, выполненных в работах [3, 4]. Общая квадратичная ошибка (дисперсия) в определении выходов представлялась квадратным корнем от суммы квадрата стандартной ошибки аппроксимации методом минимизации  $\chi^2$  и квадратов всех ошибок, рассмотренных выше, и составила около 10-12% для каждой энергии.

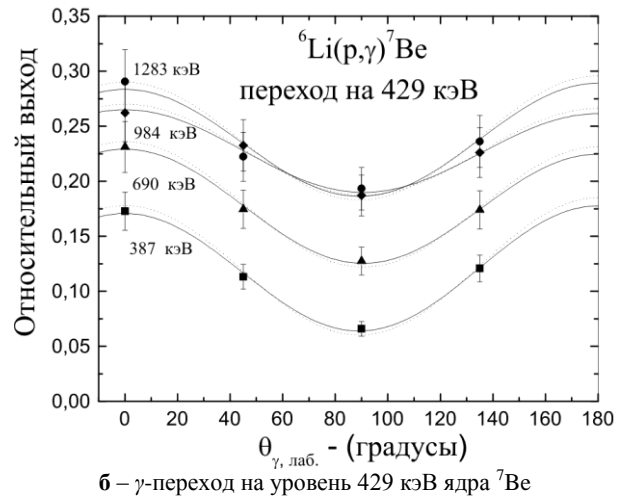
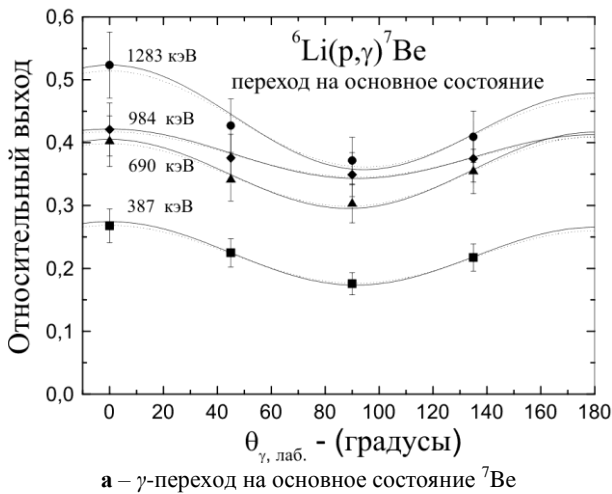


Рисунок 3. Угловые распределения реакции  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$ . Кривые – результаты подгонок по формуле (3) с учетом сглаживающих коэффициентов  $Q_1 = 0.97$  и  $Q_2 = 0.91$  (сплошные кривые) и без учета  $Q_1$  и  $Q_2$  (пунктирные кривые)

Таблица 1. Коэффициенты подгонок по полиномам Лежандра ( $a_1(E) \cdot Q_1$  и  $a_2(E) \cdot Q_2$ ) угловых распределений  $\gamma$ -лучей от реакции  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$  для перехода на основное состояние  ${}^7\text{Be}$  (верх. таблица) и для перехода на состояние 429 кэВ ядра  ${}^7\text{Be}$  (ниж. таблица), и различие (в процентах) в определении интегральных сечений реализованном используя данные работы [3] с угловыми распределениями  $\gamma$ -лучей  $1 + (1.05 \pm 0.15) \cos^2 \theta$ , взятыми из работы [2] и настоящей работы. Здесь  $Q_1$  и  $Q_2 = 0.97$  и  $0.91$  соответственно

$E_{p,\text{лаб.}}$ (кэВ)	$a_1(E) \cdot Q_1$ (абсол. единицы)	$a_2(E) \cdot Q_2$ (абсол. единицы)	Различие $\sigma_{\text{интег.}}$ (E) в%
387	$0.021 \pm 0.008$	$0.28 \pm 0.01$	10
690	$-0.017 \pm 0.023$	$0.21 \pm 0.03$	15
984	$0.012 \pm 0.021$	$0.122 \pm 0.026$	17
1283	$0.05 \pm 0.05$	$0.21 \pm 0.06$	9

$E_{p,\text{лаб.}}$ (кэВ)	$a_1(E) \cdot Q_1$ (абсол. единицы)	$a_2(E) \cdot Q_2$ (абсол. единицы)	Различие $\sigma_{\text{интег.}}$ (E) в%
387	$-0.034 \pm 0.04$	$0.36 \pm 0.03$	-6
690	$0.014 \pm 0.025$	$0.42 \pm 0.03$	3
984	$0.008 \pm 0.026$	$0.23 \pm 0.03$	14
1283	$-0.013 \pm 0.064$	$0.15 \pm 0.04$	9

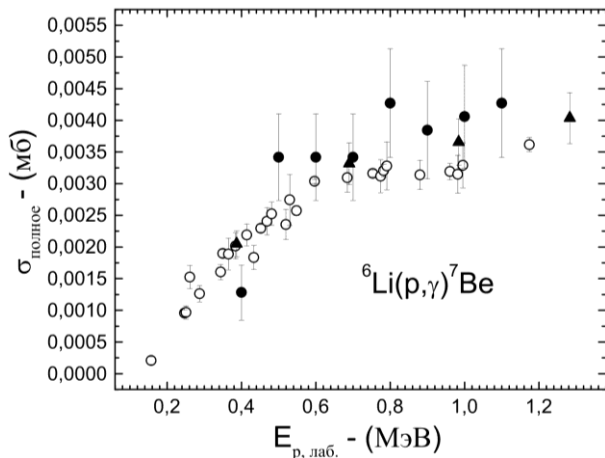


Рисунок 4. Ход кривой полной функции возбуждения реакции  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$  (сплошные треугольники- результат настоящей работы) в сравнении с данными полных сечений работы [3] (открытые круги) и работы [4] (сплошные круги)

### ВЫВОДЫ

1. Впервые измерения угловых распределений реакции  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$  для переходов на основное состояние и на уровень  $1/2^-$  (429 кэВ) ядра  ${}^7\text{Be}$  были

проведены под углами  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $135^\circ$  при энергиях  $E_{p,\text{лаб.}} = 387 - 1283$  кэВ и с точностью 10-12%.

2. Для этих переходов, впервые, получены коэффициенты разложения.

3. Показано, что в диапазоне  $E_{p,\text{лаб.}} = 387 - 1283$  кэВ угловые распределения гамма-квантов не постоянны. Более того, они значительно отличаются от данных работы [2]

4. В результате чего, интегральные сечения, полученные в работе [3], в которой использовалось угловое распределение из [2] являются заниженными на (10 – 17)%.

5. Ход кривой полных сечений реакции  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$  полученных в настоящей работе оказался в хорошем согласии с результатами предыдущих измерений, выполненных в работах [3, 4].

6. Полученные в настоящей работе коэффициенты ветвления также находятся в хорошем согласии с литературными данными.

### ЛИТЕРАТУРА

- Burtebayev, N. New measurements of the astrophysical S-factor for the  ${}^{12}\text{C}(p,\gamma){}^{13}\text{N}$  reaction at low energies and the asymptotic normalization coefficient (nuclear vertex constant) for the  $p + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{13}\text{N} + \gamma$  / N. Burtebayev, S.B. Igamov, R.J. Peterson, R. Yarmukhamedov, D.M. Zazulin // Phys. Rev. C78. – 2008. – P. 035802-1–035802-11.
- Reaction  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$  / J.B. Warren, T.K. Alexander, G.B. Chadwick // Phys. Rev. – 1956. – Vol. 101, – P. 242-245.
- Switkowski, Z.E. Cross section of the reaction  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$  / Z.E. Switkowski, J.C.P. Heggie, D.L. Kennedy, D.G. Sargood, F.C. Barker, R.H. Spear // Nucl. Phys. A. – 1979. – Vol. 331, – P. 50-60.
- Ostojic, R. Study of the direct radiative capture reaction  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$  from 0.4 to 1.1 MeV / R. Ostojic, K. Subotic, B. Stepancic // Nuovo Cim. A. – 1983. – Vol. 76. – P. 73-82.
- Зазулин, Д.М. Экспериментальное исследование взаимодействия протонов с ядрами 1p-оболочки при низких энергиях / Д.М. Зазулин // Вестник НЯЦ РК. – 2007. – Вып. 3. – С. 22–32.
- Baktybayev, M.K. The new instrumental and methodical developments in  $\gamma$ -ray and charged particle spectroscopy at the UKP-2-1 accelerator / M.K. Baktybayev, V.P. Burminsky, N. Burtebayev, B.A. Duisebayev, V. Jazairov-Kakhramanov, R.A. Zarifov, D.M. Zazulin, K.K. Kadyrzhano, S.K. Sakhiyev, N.K. Satpayev, A.M. Sargaskayev, A.M. Seytimbetov // Abstracts of the fourth Eurasian conference “Nuclear Science and its Application”. Baku, Azerbaijan, October 31 – November 3, 2006. – P. 147.
- Вылов, Ц. Прецизионная спектрометрия излучений радиоактивных нуклидов с помощью полупроводниковых детекторов / Ц. Вылов, Б.П. Осипенко, В.М. Чумин // ЭЧАЯ. – 1978. – Т. 9. – С. 1350-1459.
- Anttila, A. Use of the  ${}^{27}\text{Al}(p,\gamma){}^{28}\text{Si}$ ,  $E_p = 992$  keV resonance as a gamma-ray intensity standard / A. Anttila, J. Keinonen, M. Hautala, I. Forsblom // Nucl. Instr. Meth. – 1977. – Vol. 147. – P. 501-505.
- Schroder, U. Stellar reaction rate of  ${}^{14}\text{N}(p,\gamma){}^{15}\text{O}$  and hydrogen burning in massive stars / U. Schroder, H.W. Becker, G. Bogaert, J. Gorres, C. Rolfs, H.P. Trautvetter, R.E. Azuma, C. Campbell, J.D. King, J. Vise // Nucl. Phys. A. – 1987. – Vol. 467. – P. 240-260.
- Camp, D.C. Finite solid-angle corrections for Ge(Li) detectors / D.C. Camp, A.L. Van Lehn // Nucl. Instr. Meth. – 1969. – Vol. 76. – P. 192-240.
- Arzumanov, A.A. The electrostatic tandem accelerator UKP-2-1 at the institute of nuclear physics / A.A. Arzumanov. // Proceedings of the 13<sup>th</sup> particle accelerator conference. Dubna, Russia, October 13-15. – 1992. – Vol. 1. – P. 118-129
- Butler, J.W. Table of (p, $\gamma$ ) resonances by proton energy:  $E = 0.163 - 3.0$  MeV / J.W. Butler // U. S. Naval Research Laboratory. NRL Report. – 1959. – P. 5282-5299.
- Lyons, P.B. Total yield measurements in  ${}^{27}\text{Al}(p,\gamma){}^{28}\text{Si}$  / P.B. Lyons, J.W. Toevs and D.G. Sargood // Nucl. Phys. A. – 1969. – Vol. 130. – P. 1-24.
- Prior, R.M. Energy dependence of the astrophysical S factor for the  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$  reaction / R.M. Prior [et al] // Phys. Rev. C. – 2004. – Vol. 70. – P. 055801.
- Cecil, F.E. Evaluation of reaction rates for (p, $\gamma$ ) process on light nuclei / F.E. Cecil, D. Ferg, H. Liu, J.C. Scorby, J.A. McNeil, P.D. Kunz // Nucl. Phys. A. – 1992. – Vol. 539. – N 1. – P. 75– 87.
- Ajzenberg-Selove, F. Energy levels of light nuclei  $A = 5 - 10$  / F. Ajzenberg-Selove // Nucl. Phys. A. – 1988. – Vol. 490. – P. 1-225.

**$E_{p,\text{лаб.}} = 387 - 1283$  кэВ ЭНЕРГИЯ МӨЛШЕРІНДЕ  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$   
РЕАКЦИЯСЫНЫҢ ЖАҢА МӨНДЕРІ АЛЫНДЫ**

**Зазулин Д.М., Керимкулов Ж.К.**

*ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан*

${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$  реакциясының  $\theta_{p,\text{лаб.}} = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  және  $135^\circ$  бұрышындағы,  ${}^7\text{Be}$  ядросының негізгі және қозған күйге өту үшін энергия мөлшері  $E_{p,\text{лаб.}} = 387, 690, 984$  және  $1283$  кэВ  $\gamma$ -кванттының бұрыштық таралуы өлшенген. Бұл өтулер үшін бөліну коэффициенттері анықталған. Толық қозған функция және интегралдық бұтақталу коэффициенттері алынған. Алынған ақпараттар мен бар мәндерді салыстыру жүргізілді.

**THE NEW DATA ON  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$  REACTION HAVE  
BEEN OBTAINED AT THE ENERGIES OF  $E_{p,\text{lab.}} = 387 - 1283$  keV**

**D.M. Zazulin, Zh.K. Kerimkulov,**

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

The  $\gamma$ -ray angular distributions of the  ${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$  reaction at angles of  $\theta_{p,\text{lab.}} = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ , and  $135^\circ$  and energies of  $E_{p,\text{lab.}} = 387, 690, 984$ , and  $1283$  keV for the transitions to the ground and the first excited states of  ${}^7\text{Be}$  have been measured. Expansion coefficients for these transitions have been defined. The coefficient of branching, integral and total excitation functions have been determined. Comparison between the obtained results and available data has been made.

УДК 539.21:539.12.043:669.3

## ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ОБЛУЧЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Максимкин О.П., Гусев М.Н., Токтогулова Д.А.

*Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан*

Выполнен анализ деформационно-пластического поведения ряда облученных нейтронами металлических материалов. Рассмотрено применение ряда уравнений физики пластичности к описанию «истинных» кривых. Показано, что для меди и нержавеющей стали AISI 316 наилучшим является уравнение Свифта  $\sigma = k(\varepsilon + \varepsilon_0)^{0.5}$ .

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в радиационном материаловедении общепризнанным является тот факт, что облучение нейтронами или заряженными частицами, как правило, приводит к радиационному охрупчиванию — снижению пластичности металлических материалов. Опираясь на это представление и анализ экспериментальных диаграмм деформирования, ряд авторов делает вывод о снижении способности облученного материала к деформационному упрочнению. Действительно, на типичных инженерных диаграммах для материалов, облученных до повреждающих доз 10-15 сна, прироста нагрузки, при деформации не наблюдается [1].

В то же время показано, что деформация в облученных материалах развивается локализованно, а инженерные диаграммы непригодны для оценки деформационного упрочнения. В этой связи в ряде работ [1,2] уделяется значительное внимание рассмотрению и анализу «истинных» кривых упрочнения «напряжение  $\sigma$  — деформация  $\varepsilon$ », получаемых или расчетным путем [3] или с помощью метода экстензометрии [4]. Истинные кривые  $\sigma(\varepsilon)$  более информативны [4,5] и могут быть использованы, например, при моделировании процессов деформации с использованием «метода конечных элементов» (FEM-анализ). Отметим, что использование «истинных кривых» в численном виде не всегда удобно и во многих случаях (в частности – в программах FEM-анализа) более предпочтительным является аналитическая запись кривой деформационного упрочнения в виде уравнения.

Выбору уравнений для описания «истинных кривых» упрочнения для необлученных материалов посвящено большое количество работ (например, [6,7]), однако для облученных материалов этот вопрос рассмотрен слабо и известны лишь единичные публикации [3,8,9]. Целью данной работы было определить применимость основных известных уравнений физики пластичности к описанию кривых  $\sigma(\varepsilon)$  для облученных материалов, а также исследовать влияние облучения на параметры этих уравнений.

### ВЫБОР УРАВНЕНИЙ

При выборе уравнений было сформулировано два основных критерия:

Во-первых, поскольку для каждого свободного параметра необходим анализ его изменений от повреждающей дозы, температур облучения, испытания и т.п., представляется разумным ограничить число параметров двумя-тремя. Четыре и более свободных параметра позволят достаточно хорошо описать «истинную кривую», но, как можно полагать, это крайне затруднит придание физического смысла и температурно-дозового анализа параметров.

Во-вторых, уравнение должно учитывать основные положения дислокационной теории пластичности, то есть, его форма не может быть произвольной.

Из анализа литературных данных [6,7,10] следует, что наиболее широко используются уравнения:

$$\sigma = k \cdot \varepsilon^n \quad \text{уравнение Холломона} \quad (1)$$

$$\sigma = k \cdot \varepsilon^n + \sigma_0 \quad \text{уравнение Людвига} \quad (2)$$

$$\sigma = k(\varepsilon + \varepsilon_0)^n \quad \text{уравнение Свифта} \quad (3)$$

Известно большое число других уравнений, хорошо описывающих экспериментальные зависимости  $\sigma(\varepsilon)$ , например  $\sigma = k \cdot \ln(\varepsilon) + \sigma_0$ , однако, в отличие от (1-3) многие такие уравнения носят «подготовочный» характер [6] и нежелательны для анализа особенностей деформационного упрочнения металлов и сплавов, поскольку входящие в эти уравнения коэффициенты не имеют определенного физического смысла.

Уравнения 1-3 часто берутся за основу и модифицируются с учетом той или иной конкретной задачи. Так, частным случаем уравнения (2) является, согласно [6], уравнение:

*уравнение Людвига с двумя параметрами*

$$\sigma = k \cdot \varepsilon^{0.5} + \sigma_0 \quad (4)$$

тогда как уравнение (3) нередко используют в виде:

*уравнение Свифта с двумя параметрами*

$$\sigma = k(\varepsilon + \varepsilon_0)^{0.5} \quad (5)$$

Применение фиксированного значения  $n=0,5$  обосновывается применением теории дислокаций, постулирующей, что  $\varepsilon \sim \rho$  (где  $\rho$  — плотность дислокаций), а  $\sigma \sim \rho^{0.5}$ . В [6] высказано мнение, что случай уравнения Людвига когда  $n = 0,5$  является частным, поскольку  $n$  сильно зависит от структуры ма-

териала и, в частности – от энергии дефекта упаковки. В то же время в большом количестве работ, где широко используются положения теории дислокаций, авторы особо подчеркивают, что значение  $n$  фиксировано и равно 0,5 [10].

Ряд авторов отмечает, что в некоторых случаях кривые  $\sigma(\varepsilon)$  не описываются каким-либо одним уравнением. Тогда ее разбивают на участки (стадии), для каждого из которых определяют свой набор коэффициентов для некоторого выбранного уравнения, а иногда – и различные уравнения [12]. Число участков может варьироваться от 2 [6] до 3-4 [10], и в редких случаях — более 5. Разбиение в ряде случаев позволяет достичь лучшего согласия аналитической и экспериментальной кривых, однако при этом возникают значительные сложности с анализом точек сопряжения аппроксимирующих выражений. В рамках настоящей работы на данном ее этапе вопрос стадийности пластической деформации рассматриваться не будет, и для описания всей кривой будет использоваться одно уравнение с единым набором коэффициентов.

Отметим также, что приведенные выше уравнения Свифта, Людвига и многие другие обладают од-

ним недостатком: форма их записи полагает, что упрочнение материала будет продолжаться неограниченно долго. Это, строго говоря, неверно — экспериментальные данные [11, 7] свидетельствуют о выходе величины  $\sigma$  на насыщение и прекращении упрочнения при  $\varepsilon \sim 2..4$ . С учетом данного факта в [7] предложено соотношение вида:  $\sigma = \sigma_0 + k_1(1 - e^{-k_2 \cdot \varepsilon})$ . Его особенностью является возможность описания выхода кривой  $\sigma(\varepsilon)$  на насыщение. Тем не менее, данный аспект для отмеченных выше уравнений не является критическим, практически все рассматриваемые нами кривые лежат в области величин деформаций  $\varepsilon < 0,5$ .

Дополнительно можно рассмотреть простейшее линейное уравнение  $\sigma = k \cdot \varepsilon + \sigma_0$ . Оно не соответствует второму сформулированному критерию — не является физически обоснованным, однако именно такая форма описания деформационного упрочнения очень часто используется в программных пакетах, реализующих FEM-анализ (ANSYS, FEMLAB).

С учетом вышеизложенного, для дальнейшего рассмотрения были отобраны уравнения, сведенные в таблицу 1.

Таблица 1. Уравнения для описания кривых  $\sigma(\varepsilon)$  облученных материалов

Уравнение	Число параметров	Термин для обозначения уравнения	
$\sigma = k \cdot \varepsilon^n$	2	<b>H</b>	Холломон-2
$\sigma = k \cdot \varepsilon^{0.5} + \sigma_0$	2	<b>L-2</b>	Людвиг-2
$\sigma = k \cdot \varepsilon^n + \sigma_0$	3	<b>L-3</b>	Людвиг-3
$\sigma = k(\varepsilon + \varepsilon_0)^{0.5}$	2	<b>S-2</b>	Свифт-2
$\sigma = k(\varepsilon + \varepsilon_0)^n$	3	<b>S-3</b>	Свифт-3
$\sigma = k \cdot \varepsilon + \sigma_0$	2	<b>L</b>	Линейное-2

#### АНАЛИЗИРУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Среди значительного количества работ отобранных для рассмотрения в данном случае представляют интерес публикации, где «истинные кривые» приведены непосредственно, либо работы, в которых представлены инженерные диаграммы деформации, допускающие пересчет в истинные кривые.

На данном этапе исследования, отбирали работы, содержащие данные для меди (модельный материал) и аустенитной стабильной стали AISI316. Причем в последнем случае ограничивались диапазоном температур 20..100°C. В данных условиях, как можно полагать, для указанной стали будет иметь место «чистое» деформационное упрочнение, не «осложненное» такими явлениями, как динамическое деформационное старение [13], мартенситное превращение [14], либо двойникование.

С учетом вышеизложенного, анализировали данные, представленные в [5,13-19], а также данные, полученные авторами настоящей работы. Для операций аппроксимации применяли программный пакет Origin.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ АППРОКСИМАЦИИ «ИСТИННЫХ КРИВЫХ» ОБЛУЧЕННОЙ МЕДИ

На рисунке 1 показаны «истинные кривые» деформационного упрочнения меди, полученные в результате деформационно-экстензометрических [4] экспериментов. Сравнивая их с традиционными инженерными кривыми (рисунок 1б), можно отметить отсутствие предела прочности и области разупрочнения.

Из рисунка 1 видно, что облучение нейтронами смещает «истинные» кривые в область высоких напряжений тем сильнее, чем больше флюенс. Одновременно значительно снижается способность материала к деформационному упрочнению (оценивается как угол наклона кривой в области деформаций 0-0,05).

Результаты аппроксимации «истинных кривых» деформационного упрочнения (рисунок 1а) приведены в таблицах 2 и 3.

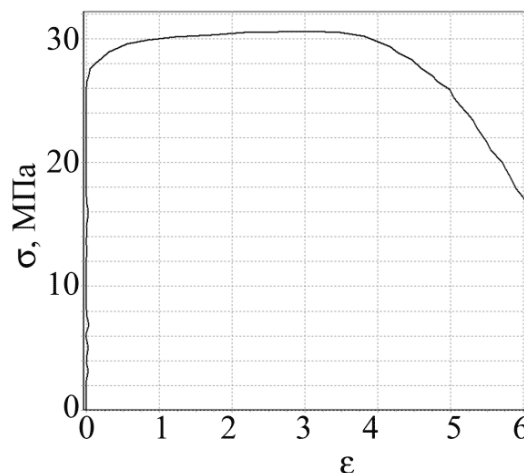
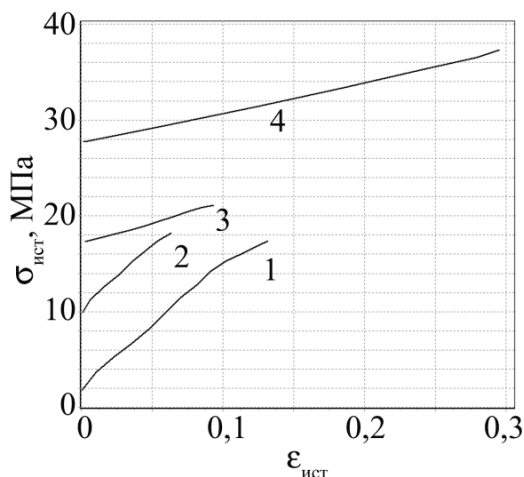
Как следует из таблицы 2, попытка выбрать зависимости, аппроксимирующие полную диаграмму растяжения (рисунок 1а), в отдельных случаях приводит к неожиданным результатам. Так, величина  $n$  может принимать значение  $\sim 0,5$  (что означает дислокационную кинетику упрочнения), а может значительно превышать 1, достигая 3. Последний факт,



учитывая, что медь материал стабильный по отношению к структурно-фазовому превращению, является нефизическим.

Согласно таблице 3, уравнения «L-2», «S-2» достаточно равноценны с точки зрения квадрата невязки и «работают» лучше, чем «Н». Линейная зависимость «L» неприменима для необлученного материала, но достаточно неплохо описывает «истинную кривую», начиная с флюенса  $\sim 10^{19}$  н/см<sup>2</sup>. Для урав-

нений «Н», «L-2» и «L» оба параметра изменяются с ростом флюенса в несколько раз, тогда как в уравнении «S-2» величина  $k$  от флюенса зависит слабо (исключая особенность при  $\Phi = 4,2 \cdot 10^{18}$  н/см<sup>2</sup>). Исходя из вышесказанного, для описания кривой « $\sigma - \epsilon$ » необлученной и облученной меди наиболее приемлемым является уравнение «S-2». Данное заключение относится к величинам локальной деформации до  $\sim 0,2 \div 0,3$ .



Состояние материала: 1 – необлученная медь; 2 –  $4,2 \cdot 10^{18}$ ; 3 –  $4,9 \cdot 10^{19}$ ; 4 –  $5 \cdot 10^{20}$  н/см<sup>2</sup>

а – Кривые «истинные напряжения – истинные деформации», полученные с использованием оптической экстензометрии

б – Инженерная диаграмма растяжения меди, облученной в реакторе ВВР-К до флюенса нейтронов  $\Phi = 4,9 \cdot 10^{19}$  н/см<sup>2</sup>

Рисунок 1.

Таблица 2. Результаты аппроксимации «истинных кривых» деформационного упрочнения меди, облученной нейтронами, (рисунок 1а) уравнениями «L-3» и «S-3»

Флюенс, н/см <sup>2</sup>	L-3, $\sigma = k \cdot \epsilon^n + \sigma_0$				S-3, $\sigma = k(\epsilon - \epsilon_0)^n$			
	k	n	$\sigma_0$	$\chi^2$	k	$\epsilon_0$	n	$\chi^2$
0	46,22	0,52	2,36	0,5	46,2	-0,004	0,46	0,5
0	81,25	0,78	0,94	0,7	78,19	-0,003	0,74	0,72
$4,2 \cdot 10^{18}$	33,34	0,24	0,67	0,2	33,77	-0,0002	0,23	0,17
$4,2 \cdot 10^{18}$	141,43	1,02	9,75	0,1	164,1	-0,09	1,16	0,06
$4,9 \cdot 10^{19}$	35,11	0,87	16,1	0,1	41,33	-0,15	0,5	0,08
$4,9 \cdot 10^{19}$	58,95	1,13	17,2	0,01	8,5	-1,2	3	0,02
$5 \cdot 10^{20}$	27,59	0,98	26,9	0,01	40,27	-0,46	0,52	0,01
$5 \cdot 10^{20}$	34,56	1,04	28,3	0,01	13,13	-1,56	1,72	0,01

Таблица 3. Результаты аппроксимации «истинных кривых» деформационного упрочнения меди, облученной нейтронами, (рисунок 1а) уравнениями «Н», «L2» и «L»

Флюенс, н/см <sup>2</sup>	Н, $\sigma = k \cdot \epsilon^n$			L-2, $\sigma = k \cdot \epsilon^{0,5} + \sigma_0$			S-2, $\sigma = k(\epsilon - \epsilon_0)^2$			Linear, $\sigma = k \cdot \epsilon + \sigma_0$		
	k	n	$\chi^2$	k	$\sigma_0$	$\chi^2$	k	$\epsilon_0$	$\chi^2$	k	$\sigma_0$	$\chi^2$
0	42,3	0,41	0,62	45,4	2,1	0,53	50,3	-0,007	0,53	93,76	6,51	1,67
0	72,41	0,7	0,84	46,77	-0,67	1,75	45,4	0,003	1,78	125,23	1,96	1,05
$4,2 \cdot 10^{18}$	33,54	0,22	0,17	42,11	7,73	0,23	61,4	-0,028	0,41	120	11,06	0,62
$4,2 \cdot 10^{18}$	33,09	0,23	0,78	43,52	6,84	0,3	61,9	-0,02	0,11	135,62	9,7	0,06
$4,9 \cdot 10^{19}$	26,98	0,11	0,63	21,34	14,14	0,16	41,4	-0,153	0,08	43,14	16,43	0,09
$4,9 \cdot 10^{19}$	23,64	0,06	0,26	15,82	15,9	0,09	40,7	-0,17	0,02	43,59	17,1	0,02
$5 \cdot 10^{20}$	30,67	0,02	0,31	10,98	26,09	0,06	40,5	-0,44	0,01	28,75	26,93	0,01
$5 \cdot 10^{20}$	38,69	0,08	0,8	19,62	25,74	0,25	45,9	-0,37	0,03	32,8	28,24	0,01

Подчеркнем, что при флюенсе нейтронного облучения  $\sim 10^{19}$  н/см<sup>2</sup> механизм деформации на микроуровне изменяется — вместо образования ячеистой дислокационной структуры в объеме материала появляются т.н. «бездефектные каналы», а на поверхности происходит формирование своеобразного паркетобразного деформационного рельефа — серии ломаных линий расположенных (в подавляющем большинстве) по углом 45° к оси растяжения (рисунок 2). Подчеркнем, что подобное изменение механизма деформации на микроуровне достаточно слабо влияет на макроскопические характеристики деформации материала.

**РЕЗУЛЬТАТЫ АППРОКСИМАЦИИ «ИСТИННЫХ» КРИВЫХ УПРОЧНЕНИЯ ДЛЯ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ AISI 316**

На рисунках 3-4 приведены результаты аппроксимации и дозовые зависимости коэффициентов во всех рассмотренных уравнениях для стали AISI 316 по данным работ [5, 15-19].

**СРАВНЕНИЕ УРАВНЕНИЙ**

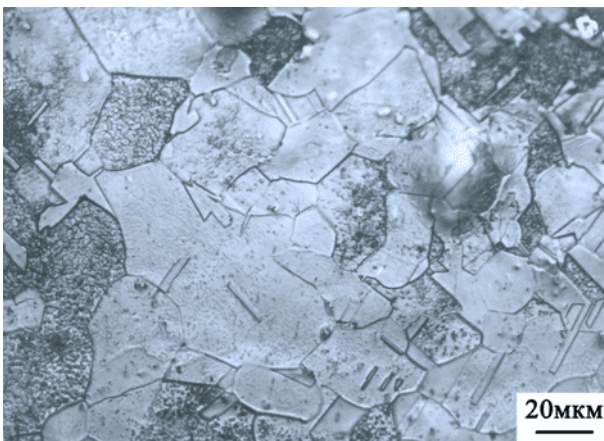
Предполагается, что наиболее удобным критерием для выбора адекватного аппроксимирующего уравнения для одной обрабатываемой экспериментальной кривой растяжения является «квадрат невязки» либо среднеквадратичное отклонение, но сравнивать по этим критериям разные кривые нельзя, поскольку они содержат разное число точек. Приведение аппроксимируемых кривых к одинаковому числу точек нежелательно, ввиду разной про-

тяженности кривых по шкале деформаций. В этой связи для сравнения между собой различных уравнений, описывающих «истинные кривые», введем численный критерий, изменяющийся от 0 до 1, в виде:

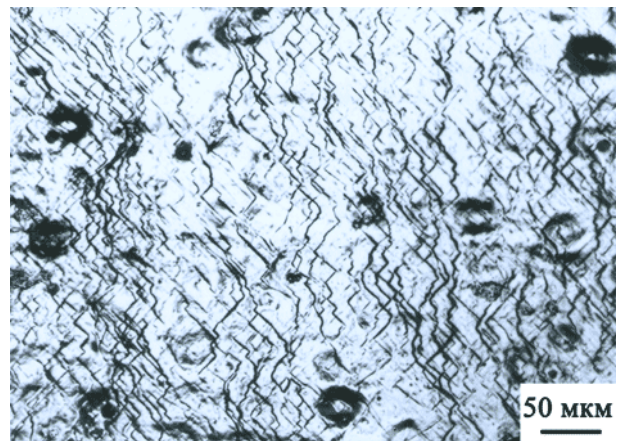
$$Ri = 2\psi_{min}/(\psi_{min} + \psi_i) \quad (6)$$

т.е. для выбранных *i*-уравнений «критерий качества» *Ri* для определяется как отношение минимального квадрата невязки  $\psi$  из полученных *i*-значений к величине  $\psi$  для текущего *i*-го уравнения. Очевидно, что эта величина равна 1 для наилучшего уравнения и убывает с ростом  $\psi$  (ухудшением качества аппроксимации).

В таблице 4 представлены значения *Ri* аппроксимирующих уравнений «истинных кривых» деформационного упрочнения меди, облученной нейтронами до различных флюенсов. Поскольку выше было показано, что уравнения «S-3», «L-3» показывают нестабильную аппроксимацию, то критерий *Ri* для них не приводится. Из таблицы 4 следует, что с ростом флюенса «истинная кривая» растяжения вырождается в прямую, в результате чего она хорошо описывается линейным уравнением, в то время как применение уравнений «Н» и «L-2» для аппроксимации становится нежелательным. Критерий *Ri* для уравнения «S-2» практически не изменяется с облучением, в связи с этим аппроксимацию «истинных кривых» для меди предпочтительнее проводить с использованием данного уравнения.

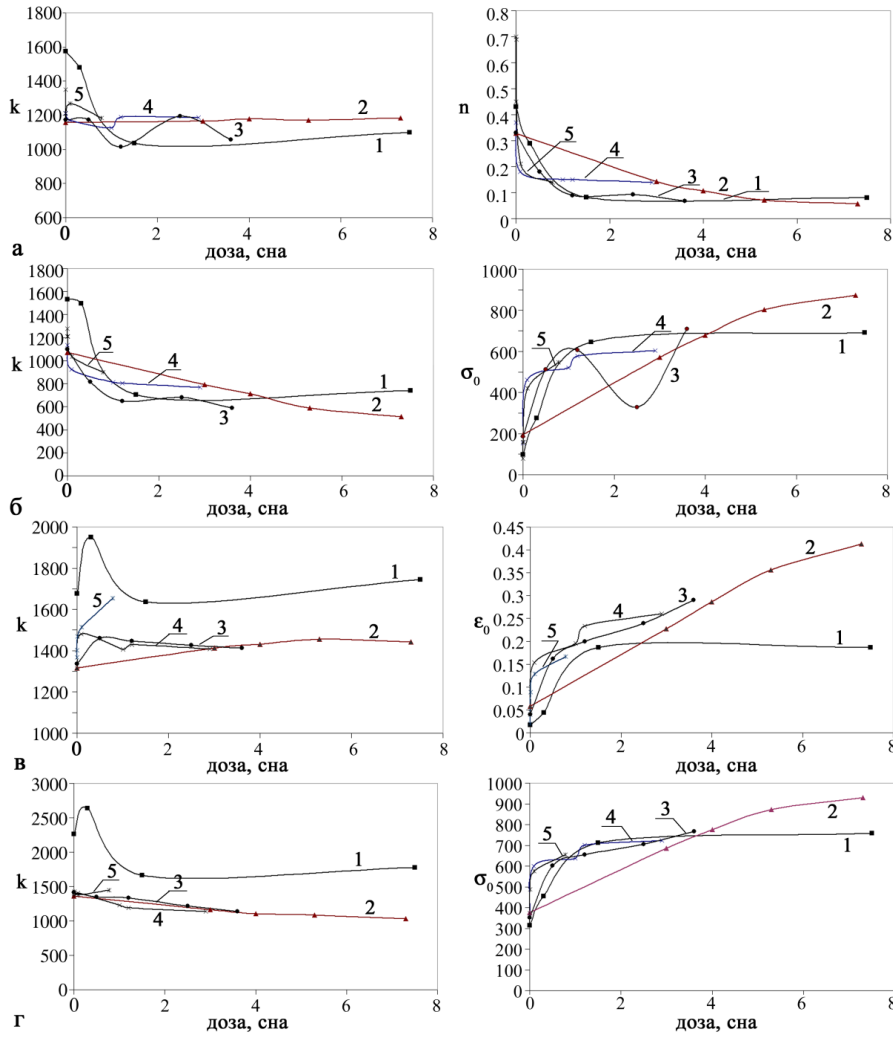


а



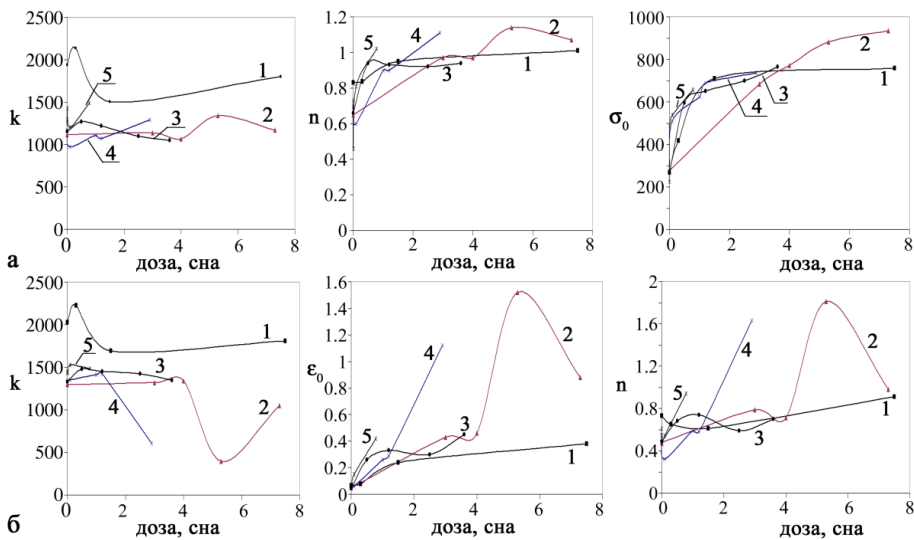
б

Рисунок 2. Исходная микроструктура до деформации (а) и деформационный рельеф (б) на поверхности образца меди (локальная деформация  $\sim 15\%$ , флюенс  $4,2 \cdot 10^{18}$  н/см<sup>2</sup>)



Коэффициенты: а —  $k$ ,  $n$  («Н»); б —  $k$ ,  $\sigma_0$  («L-2»); в —  $k$ ,  $\epsilon_0$  («S-2»); г —  $k$ ,  $\sigma_0$  («L»). Источник: 1- [15]; 2 – [16]; 3 – [5]; 4 – [17]; 5 – [19].

Рисунок 3. Коэффициенты аппроксимирующих уравнений «Н», «L-2», «S-2», «L» в зависимости от повреждающей дозы для стали AISI 316 по данным работ [5, 15-19]



Коэффициенты: а —  $k$ ,  $n$ ,  $\sigma_0$  («L-3»); б —  $k$ ,  $n$ ,  $\epsilon_0$  («S-3»). Источник: 1– [15]; 2 – [16]; 3 – [5]; 4 – [17]; 5 – [19]

Рисунок 4. Коэффициенты аппроксимирующих уравнений «L-3», «S-3» в зависимости от уровня повреждающей дозы для стали AISI 316 по данным работ [5, 15-19]

Таблица 4. Критерий  $R_i$  для меди, облученной нейтронами до различных флюенсов нейтронов

Флюенс, н/см <sup>2</sup>	H	L-2	S-2	L
0	0,893	0,971	0,971	0,461
0	0,923	0,583	0,576	0,814
$4,2 \cdot 10^{18}$	1,000	0,850	0,586	0,430
$4,2 \cdot 10^{18}$	0,138	0,324	0,690	0,983
$4,9 \cdot 10^{19}$	0,225	0,667	1,000	0,941
$4,9 \cdot 10^{19}$	0,074	0,200	0,667	0,667
$5 \cdot 10^{20}$	0,063	0,286	1,000	1,000
$5 \cdot 10^{20}$	0,025	0,077	0,500	1,000
среднее значение критерия $R_i$				
	0,418	0,495	0,749	0,787

Согласно данным, приведенным в таблице 5, критерий  $R_i$  достаточно слабо зависит от дозы облучения для большинства уравнений в случае стали AISI 316, исключая линейное соотношение  $\sigma = k \cdot \varepsilon + \sigma_0$ . Для него  $R_i$  увеличивается, то есть неприемлемое для малых повреждающих доз, данное уравнение достаточно хорошо описывает «истинные

кривые» для высокооблученного материала. В таблице 5 представлены значения  $R_i$  для аппроксимирующих уравнений применительно к «истинным кривым» деформационного упрочнения стали AISI 316 по данным, представленным в работах [5,15-19]. С целью получения численной оценки  $R_i$  того или иного уравнения усредним  $R_i$  для кривых (таблица 5). Заключительная строка таблицы является средним значением для данных, показанных в столбце и является общей оценкой применимости того или иного уравнения.

Как следует из таблицы 4, степенное уравнение «H» и уравнение «L-2» являются наихудшими. Уравнение «S-3» по критерию  $R_i$  наилучшее, но оно имеет недостаток, обусловленный непредсказуемым поведением коэффициентов при росте дозы (рисунок 4). Применимость этого уравнения следует анализировать с помощью более строгого математического аппарата, ограничивающего диапазон коэффициентов.

Таблица 5. Среднее значение критерия  $R_i$  и среднее качество описания  $R_i$  для стали AISI 316, облученной нейтронами до различных доз

Источник данных	H	L-2	L-3	S-2	S-3	L
[15]	0,027	0,081	0,935	0,519	0,933	0,575
[16]	0,027	0,095	0,891	0,662	0,887	0,675
[17]	0,086	0,283	0,881	0,696	0,977	0,549
[18]	0,109	0,199	0,880	0,7159	0,975	0,715
[19]	0,326	0,065	0,536	0,521	0,987	0,266
[5]	0,024	0,113	0,823	0,894	0,995	0,709
среднее качество описания $R_i$ для всех данных						
	0,100	0,139	0,824	0,668	0,959	0,582

Уравнение «L-3» имеет очень хорошие средние показатели, но определенным его недостатком является то, что все три коэффициента изменяются с ростом флюенса. Отметим, что уравнение «S-2» незначительно уступает уравнению «L-3» по качеству описания кривых (таблица 5), но имеет на один параметр меньше. При этом только один параметр уравнения «S-2» заметно изменяется при увеличении повреждающей дозы.

Линейное уравнение выглядит предпочтительным для доз более 2...3 сна, но следует иметь в виду, что данный вывод относится лишь к малым деформациям ( $\varepsilon < 0.2 \dots 0.3$ ).

#### ЛИТЕРАТУРА

- Максимкин, О.П. Метод изучения локализации деформации в металлических материалах, облученных до высоких повреждающих доз / О.П. Максимкин, М.Н. Гусев, И.С. Осипов // Завод. лаб.– 2006.– Т.72., №11. – С.52-55.
- Максимкин, О.П. Взаимосвязь истинных напряжений и деформаций при пластическом течении облученных металлических поликристаллов / О.П. Максимкин, М.Н. Гусев, И.С. Осипов // ВАНТ. Серия: Физика радиац. повреждений и радиац. материаловедение.– 2007.– №. 2. (90).– С. 33-38.
- Мальгин, Г.А. Анализ факторов, вызывающих нестабильность деформации и потерю пластичности облученной нейтронами меди / Г.А. Мальгин // Физика Твёрдого Тела.– 2005.– Т.47, вып.4.–С.632-638.
- Gusev, M.N. Application of digital marker extensometry to determine the true stress-strain behavior of irradiated metals and alloys / M. N. Gusev, O. P. Maksimkin, I. S. Osipov, F. A Garner // DOE/ER-0313/43 – Fusion Materials (December 31, 2007), pp. 198-209.
- Byun, T.S. Plastic instability in polycrystalline metals after low temperature irradiation / T.S. Byun, K. Farrell // Acta Materialia.– 2004.–52.–P.1597–1608.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено применение ряда уравнений физики пластичности (уравнение Холломона, Людвига, Свифта и их модификации) к описанию «истинных деформационных кривых» меди и стали AISI316, облученных нейтронами. Показано, что для указанных материалов наилучшим является соотношение Свифта  $\sigma = k(\varepsilon + \varepsilon_0)^{0.5}$ . Для исследованных уравнений проанализировано изменение коэффициентов в зависимости от флюенса (повреждающей дозы).

6. Пановно, В.М. Об анализе кривых упрочнения поликристаллов / В.М. Пановно, И.М.Гренков //ФХММ.– 1976.–№4.– С.113-117.
7. Малыгин Г.А. механизм деформационного упрочнения и образования дислокационных структур в металлах при больших пластических деформациях // ФТТ.–2006.–Т.48, Вып.4.–С.651-657.
8. Бучатский, А.А. Прогнозирование длительной прочности аустенитных нержавеющей сталей для реакторов на быстрых нейтронах / А.А. Бучатский, Б.З. Марголин, А.Г. Гуленко, И.П. Куревич // Тезисы IV конференции молодых ученых и специалистов материаловедов ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей».–С.14.
9. Неклюдов, И.М. Влияние высокоэнергетического (е, г)-облучения на деформационное упрочнение стали AISI316 / И.М. Неклюдов [и др.] // ВАНТ, Серия: Физика рад.повреждений и рад.материаловедение.–2003.–№6.–С.36-39.
10. Трефилов, В.И. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов / Трефилов В.И., Моисеев В.Ф.–М.–1989.– 256с.
11. Белл, Дж. Экспериментальные основы механики деформируемого твердого тела / Дж. Белл.– М.: Наука.–1984.–т.2.– 432 с.
12. Sivaprasad P.V. et al. Applicability of Ludwigs's equation for describing the tensile flow behavior of warm rolled type 316
13. Сакбаев, М.Ж. Динамическое деформационное старение железа и некоторых хромоникелевых сплавов, подвергнутых радиационному воздействию: автореф.дисс... канд. физ.-матем.наук:01.04.07 / Сакбаев Максим Жанович.– Алматы, 1993.– 24с.
14. Максимкин, О.П. Фазово-структурные процессы и их роль в упрочнении и охрупчивании облученных металлических материалов: автореф.дисс... докт.физ.-матем.наук: 01.04.07 / Максимкин Олег Прокофьевич.– Алматы, 1996.
15. Bailat, C. Deformation modes of proton and neutron irradiated stainless steels / C. Bailat, F. Groschel, M. Victoria // Journal of Nuclear Materials.–2000.–276.-P. 283-288.
16. Dai, Y. Tensile properties of EC316LN irradiated in SINQ to 20dpa/ Dai Y. [et al.] // JNM.–2008.– 377.– P.109-114.
17. Xianglin, Wu, The role of deformation mechanisms in flow localization of 316L stainless steel/ Wu Xianglin [et al.] // Journal of Nuclear Materials.–2006.–356 (70–77).– P. 70-77.
18. Xiao, P. Modeling tensile response and flow localization effects in selected copper alloys / P. Xiao [et al.] // JNM.–2004.– 329-333.–P.1088-1092.
19. Hashimoto, N. Deformation-induced Martensite Formation and Dislocation Channeling in Neutron-irradiated 316 Stainless Steel / N. Hashimoto, T.S. Byun // JNM (2007).

**СӘУЛЕМЕН ЕМДЕЛГЕН МЕТАЛЛ МАТЕРИАЛДАРДЫҢ  
ТҮРІН ӨЗГЕРТЕТІН НЫҒАЙТУЫ. АНАЛИТИКАЛЫҚ СУРЕТТЕУ**

**Максимкин О.П., Гусев М.Н., Токтогулова Д.А.**

*ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан*

Нейтрондармен сәулемен емделген металл материалдардың қатар деформация-әсем мінез-құлықтары талдау орындалған. Суреттеуге әсемдік физиктары тендеулерді қатар қолдану қаралған «нағыздардың» қисықтардың. Көрсетілген, не мысқа арналған және тұрақты болаттары AISI 316 ең жақсымен Свифта тендеуі келеді.

**DEFORMATION HARDENING OF THE IRRADIATED METAL MATERIALS.  
THE ANALYTICAL DESCRIPTION**

**O.P. Maksimkin, M.N. Gusev, D.A. Toktogulova**

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

The analysis of deformation-plastic behavior of some the metal materials irradiated with neutrons is made. Application of some the equations of physics of plasticity to the description of "true" curves is considered. It is shown that for copper and stainless steel AISI of 316 best Swift's equation is appear.

УДК 577.4:577.391:504.4.054:539.16

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСТЕНИЙ  
В КАЧЕСТВЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОДЕРЖАНИЯ  $^3\text{H}$  В ГРУНТОВЫХ ВОДАХ**<sup>1</sup>Ларионова Н.В., <sup>1</sup>Лукашенко С.Н., <sup>1</sup>Субботин С.Б., <sup>1</sup>Ляхова О.Н., <sup>1</sup>Айдарханов А.О., <sup>2</sup>Бахтин Л.В.<sup>1</sup>Институт радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан<sup>2</sup>Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В работе приводятся некоторые параметры перераспределения радионуклида  $^3\text{H}$  между растениями и природными водами в различных экологических условиях. Рассмотрена возможность использования представителей разных экологических групп растений по отношению к воде в качестве показателей содержания  $^3\text{H}$  в грунтовых водах. Установлена взаимосвязь между изменением концентрации  $^3\text{H}$  в растениях с концентрацией  $^3\text{H}$  в грунтовых водах для отдельных экосистем территории СИП. Подтверждена возможность использования определенных видов растений в качестве показателей содержания  $^3\text{H}$  в грунтовых водах.

**ВВЕДЕНИЕ**

До настоящего времени основной проблемой бывшего Семипалатинского испытательного полигона (СИП) считались так называемые «испытательные площадки», характеризующиеся значительным радиоактивным загрязнением почвенно-растительного покрова. В 2006-2007 гг. при отборе разовых проб были обнаружены повышенные концентрации  $^3\text{H}$  в водах р. Шаган – сотни кБк/кг и грунтовых водах за пределами горного массива Дегелен (бывшая испытательная площадка «Дегелен») – десятки кБк/кг. Таким образом, выявлены потенциально опасные участки – зоны загрязненных  $^3\text{H}$  подземных (приповерхностных) вод. Миграция же  $^3\text{H}$  с грунтовыми водами способствует включению последнего в единую гидродинамическую систему, в связи с чем, проблема приобретает региональный характер.

Приведенные факты становятся весомым обоснованием необходимости проведения исследований характера и уровней загрязнения  $^3\text{H}$  грунтовых вод потенциально опасных территорий. Вследствие приоритетности данного вопроса и масштабов планируемых работ появляется необходимость в разработке метода, который позволял бы оценивать содержание  $^3\text{H}$  в грунтовых водах без дорогостоящего бурения. В данной работе в качестве показателей содержания  $^3\text{H}$  в грунтовых водах рассмотрена возможность использования растений. В сложившейся ситуации подобная методика, используемая ранее для прогноза минерализации подземных вод [1], может стать наиболее выгодной при определенном подборе различных видов растений, использующих в качестве источника влаги те или иные грунтовые или поверхностные воды, в зависимости от экологических условий произрастания.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Исследования проводились в районе р. Шаган и горного массива Дегелен [2, 3].

**Объекты исследования**

Выбор объектов исследования был основан на классификации растений по отношению к влаге. Так, самые высокие требования к воде у гигрофитов,

поэтому они селятся на берегах рек и озер, чаще всего близ поверхностных водотоков (водоемов). Растения, которые предпочитают умеренное увлажнение, называются мезофитами. К этой группе относятся растения, произрастающие на участках с дополнительным увлажнением, например в поймах рек, где недалеко от поверхности залегают грунтовые воды. Как гигрофиты, так и мезофиты обладают разветвленной корневой системой, но располагается она на небольшой глубине от поверхности почвы. Из гигрофитов в данной работе объектом исследования выбран тростник (*Phragmites australis*), мезофиты представлены волоснецом (*Leymus angustus*), а также представителями лугового разнотравья.

Растения степей и пустынь приспособились к минимальному испарению влаги и отражению солнечного света. Растения эти, называемые ксерофитами, имеют неглубокую, но разветвленную корневую систему. Некоторые же ксерофиты размещаются вдоль водотоков и на площадях распространения относительно неглубоко залегающих грунтовых вод. Эти растения, фреатофиты, обладают глубоко проникающими корнями, достигающими уровня грунтовых вод. Среди фреатофитов основными объектами исследования стали чий (*Achnatherum splendens*) и чингил (*Halimodendron halodendron*).

**Методика отбора проб**

Отбор проб растений в основном проводился по видовому составу. Выбор методики отбора проб в каждом отдельном случае зависел от поставленной задачи. Состав проб включал надземные части растений. В отдельных случаях отобраны пробы грунтовых, подрусловых и поверхностных вод.

**Радионуклидный анализ**

Удельная активность  $^3\text{H}$  определялась в свободной воде растений, выделенной при возгонке ( $t$  до  $200^\circ\text{C}$ ). Анализ проб, в том числе и проб грунтовых, подрусловых и поверхностных вод, проводился методом жидкосцинтилляционной спектрометрии на ЖС-спектрометре TRI-CARB 2900 TR.



**РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

**Выявление параметров и динамики содержания  $^3\text{H}$  в растениях**

В рамках исследования параметров и динамики содержания  $^3\text{H}$  в растениях вдоль русла р. Шаган заложено 6 исследовательских площадок, каждая из которых представляет собой участок площадью ~100 м<sup>2</sup>, включающий в себя часть русла р. Шаган, уступ и территорию прилегающей террасы (рисунок 1а).

На каждой исследовательской площадке в 2007 - 2008 гг. произведен периодический отбор проб растений. В качестве опытных растений выбраны: вейник (*Calamagrostis arundinacea*), произрастающий в воде, волоснец (*Leymus angustus*), распространенный

по территории русла и иногда занимающий уступ, и чий (*Achnatherum splendens*), произрастающий на террасе. Результаты анализа представлены на гистограмме (рисунок 2).

На основании полученных данных для дальнейшего изучения динамики содержания  $^3\text{H}$  в растениях выбрано 3 мониторинговые площадки (рисунок 1б). Отбор проб исследуемых видов растений проводился с левой береговой зоны (на мониторинговых площадках №№ 1 и 2) и с правой береговой зоны (на мониторинговой площадке № 3) ежемесячно с мая по август. Всего отобрано 36 проб (4 раза по 3 пробы с каждой площадки). Результаты анализа  $^3\text{H}$  представлены в таблице 1.



а – точки отбора проб растений (2007 - 2008 гг.)

б – мониторинговые площадки

Рисунок 1. Схема расположения

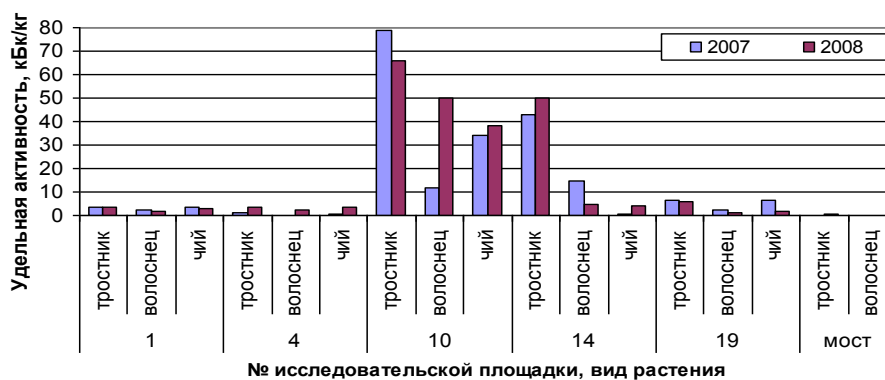


Рисунок 2. Содержание  $^3\text{H}$  в свободной воде растений (2007-2008 гг.)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСТЕНИЙ  
В КАЧЕСТВЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОДЕРЖАНИЯ <sup>3</sup>H В ГРУНТОВЫХ ВОДАХ**

Таблица 1. Удельная активность <sup>3</sup>H в свободной воде растений, поверхностных и подрусловых водах

Период отбора	№ мониторинговой площадки	Удельная активность <sup>3</sup> H, Бк/кг				
		в растениях			в воде	
		Тростник ( <i>Phragmites australis</i> )	Волоснец ( <i>Leymus angustus</i> )	Чий ( <i>Achnaterum splendens</i> )	поверхностная	подрусловая
май	1	(5,5±0,1)·10 <sup>3</sup>	(2,5±0,1)·10 <sup>3</sup>	(0,7±0,1)·10 <sup>3</sup>	(7,7±0,1)·10 <sup>3</sup>	(7,9±0,1)·10 <sup>3</sup>
	2	(1,0±0,1)·10 <sup>5</sup>	(0,6±0,1)·10 <sup>5</sup>	(0,6±0,1)·10 <sup>5</sup>	(2,0±0,1)·10 <sup>5</sup>	(2,7±0,1)·10 <sup>5</sup>
	3	(1,0±0,1)·10 <sup>4</sup>	(0,2±0,1)·10 <sup>4</sup>	(0,2±0,1)·10 <sup>4</sup>	(4,1±0,1)·10 <sup>4</sup>	(5,7±0,1)·10 <sup>4</sup>
июнь	1	(3,8±0,4)·10 <sup>3</sup>	(3,3±0,3)·10 <sup>3</sup>	(2,7±0,3)·10 <sup>3</sup>	(4,3±0,1)·10 <sup>3</sup>	(4,1±0,1)·10 <sup>3</sup>
	2	(1,0±0,1)·10 <sup>5</sup>	(0,6±0,1)·10 <sup>5</sup>	(0,7±0,1)·10 <sup>5</sup>	(1,4±0,1)·10 <sup>5</sup>	(1,2±0,1)·10 <sup>5</sup>
	3	(0,7±0,1)·10 <sup>4</sup>	(0,3±0,1)·10 <sup>4</sup>	(0,6±0,1)·10 <sup>4</sup>	(2±0,1)·10 <sup>4</sup>	(1,9±0,1)·10 <sup>4</sup>
июль	1	(3,5±0,3)·10 <sup>3</sup>	(2,0±0,2)·10 <sup>3</sup>	(2,7±0,1)·10 <sup>3</sup>	(6,5±0,1)·10 <sup>3</sup>	(7±0,1)·10 <sup>3</sup>
	2	(0,7±0,1)·10 <sup>5</sup>	(0,5±0,1)·10 <sup>5</sup>	(0,4±0,1)·10 <sup>5</sup>	(2,0±0,1)·10 <sup>5</sup>	(1,4±0,1)·10 <sup>5</sup>
	3	(0,9±0,1)·10 <sup>4</sup>	(0,2±0,1)·10 <sup>4</sup>	(0,3±0,1)·10 <sup>4</sup>	(2,8±0,1)·10 <sup>4</sup>	(2,8±0,1)·10 <sup>4</sup>
август	1	(4,0±0,4)·10 <sup>3</sup>	(2,6±0,3)·10 <sup>3</sup>	(2,9±0,3)·10 <sup>3</sup>	(6±0,1)·10 <sup>3</sup>	(6,5±0,1)·10 <sup>3</sup>
	2	(0,9±0,1)·10 <sup>5</sup>	(0,6±0,1)·10 <sup>5</sup>	(0,5±0,1)·10 <sup>5</sup>	(1,9±0,1)·10 <sup>5</sup>	(1,8±0,1)·10 <sup>5</sup>
	3	(0,5±0,1)·10 <sup>4</sup>	(0,1±0,1)·10 <sup>4</sup>	(0,1±0,1)·10 <sup>4</sup>	(3,2±0,1)·10 <sup>4</sup>	(3,2±0,1)·10 <sup>4</sup>

На основании полученных данных отмечено, что наибольшие значения удельной активности <sup>3</sup>H в растительности характерны для мониторинговой площадки № 2, что обусловлено более высоким содержанием данного радионуклида в основных предполагаемых источниках загрязнения – поверхностных и подрусловых водах (относительно остальных 2-х площадок). Из трех исследуемых видов растений более высокие концентрации <sup>3</sup>H наблюдаются в тростнике (*Phragmites australis*), что, по-видимому, связано с его произрастанием непосредственно в воде.

Для более детальной оценки распределения <sup>3</sup>H между водой и растениями рассчитаны отношения удельной активности <sup>3</sup>H в свободной воде растений к удельной активности <sup>3</sup>H в поверхностных и подрусловых водах (таблица 2).

По результатам проведенного расчета выявлено, что для всех мониторинговых площадок в течение всего периода проведения исследований (с мая по август) в поступлении <sup>3</sup>H в исследуемые виды растений поверхностные и подрусловые воды принимают почти одинаковое долевое участие.

Относительная стабильность перераспределения <sup>3</sup>H между водой и растениями сохраняется в условиях различной концентрации <sup>3</sup>H в поверхностных и

подрусловых водах. Так, для мониторинговых площадок № 1 и № 2 расчетные значения долевого перераспределения <sup>3</sup>H между водой и растениями составляют 0,51 и 0,40 соответственно. Некоторое снижение поступления <sup>3</sup>H в растения отмечается для мониторинговой площадки № 3 (среднее расчетное значение 0,15), что, по-видимому, обусловлено дополнительным подтоком чистых грунтовых вод с правой береговой зоны р. Шаган. Повышение интенсивности процесса поступления <sup>3</sup>H в растения отмечается в июне, что может быть связано с метеорологическими условиями, например с характером выпавших осадков.

Результаты проведенного расчета подтверждают факт наибольшего поступления <sup>3</sup>H в тростник (*Phragmites australis*) (среднее расчетное значение 0,49). Для чия (*Achnaterum splendens*) и волоснеца (*Leymus angustus*) значимой разницы в поступлении <sup>3</sup>H не отмечается – средние расчетные значения 0,29 и 0,28 соответственно.

Среднее содержание <sup>3</sup>H в растениях для экосистемы р. Шаган составляет приблизительно треть от содержания данного радионуклида в поверхностных и подрусловых водах.

Таблица 2. Отношение удельной активности <sup>3</sup>H в свободной воде растений к удельной активности <sup>3</sup>H в поверхностных и подрусловых водах

Время отбора проб	Предполагаемые источники поступления <sup>3</sup> H в растения	Мониторинговые площадки									Среднее
		1			2			3			
		Тростник ( <i>Phragmites australis</i> )			Волоснец ( <i>Leymus angustus</i> )			Чий ( <i>Achnaterum splendens</i> )			
Май	Поверхностные воды	0,69	0,53	0,22	0,32	0,29	0,04	0,08	0,31	0,04	0,28
	Подрусловые воды	0,68	0,38	0,16	0,32	0,22	0,03	0,08	0,22	0,03	0,24
Июнь	Поверхностные воды	0,88	0,68	0,35	0,77	0,41	0,16	0,63	0,51	0,28	0,52
	Подрусловые воды	0,93	0,79	0,37	0,80	0,48	0,16	0,66	0,59	0,29	0,56
Июль	Поверхностные воды	0,54	0,34	0,31	0,31	0,26	0,08	0,42	0,19	0,10	0,28
	Подрусловые воды	0,50	0,49	0,31	0,29	0,37	0,08	0,39	0,28	0,10	0,31
Август	Поверхностные воды	0,67	0,48	0,15	0,43	0,35	0,03	0,48	0,29	0,02	0,32
	Подрусловые воды	0,62	0,49	0,15	0,40	0,36	0,03	0,45	0,29	0,02	0,31
Среднее		0,69	0,52	0,25	0,46	0,34	0,08	0,40	0,34	0,11	0,35



### Изучение пространственного распределения $^3\text{H}$ в растительном покрове

Изучение пространственного распределения  $^3\text{H}$  в растительном покрове проводилось в районе штольни № 176 и штольни № 177 горного массива Дегелен (рисунок 3).

Учитывая специфические особенности механизмов перераспределения  $^3\text{H}$  в компонентах природной среды и считая основным источником загрязнения водоток штольни № 176, для изучения содержания  $^3\text{H}$  в растениях береговой зоны относительно русла был заложен поперечный профиль с отбором проб растений по видовому составу. Расстояние между точками отбора составляло 10 м (рисунок 3, а). В качестве опытного вида выбран волоснец (*Leymus angustus*). Всего отобрано 8 проб растений. Результаты представлены на рисунке (рисунок 4).

По данным проведенного анализа удельная активность  $^3\text{H}$  в отобранных пробах растений достигает  $2,2 \cdot 10^5$  Бк/кг. Максимальные значения отмечаются в точках, расположенных в 5 м по обеим сторонам от водотока. По мере удаления от русла содержание  $^3\text{H}$  в пробах растений закономерно постепенно снижается. Более резкий спад отмечается слева от русла, что в данном случае можно объяснить бо-

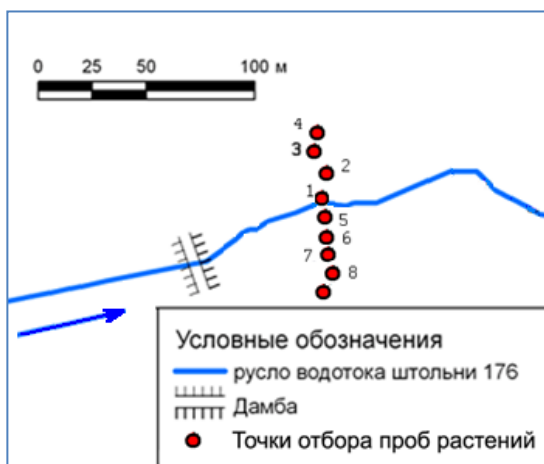
лее значительным повышением в рельефе левого берега относительно правого. Выпадом из общей закономерности является удельная активность  $^3\text{H}$  в пробе растений в точке, расположенной в 45 м справа от русла.

Для оценки распределения  $^3\text{H}$  в растительном покрове территории района штольни № 177, считая основным источником загрязнения водоток штольни, выходящий из-под навала, вдоль его основного русла и до зоны конечного стока было заложено 4 поперечных профиля и 8 единичных точек (рисунок 3, б).

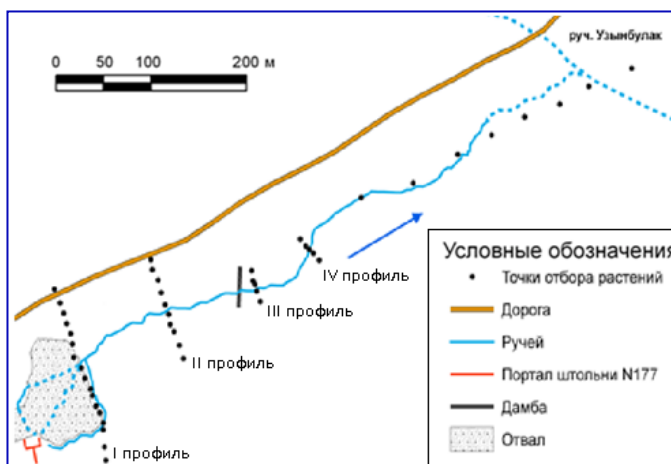
Расстояние между точками в каждом профиле составляло 10 м. Расстояние между I-м, II-м и III-м профилями – по 100 м, между III-м, IV-м и единичными точками дальше по руслу – по 50 м.

Для определения содержания  $^3\text{H}$  во всех точках отобраны смешанные пробы растений, представленные в зависимости от характера рельефа и уровня увлажнения каждой точки основными составляющими луговых и степных сообществ, а также степных сообществ с элементами петрофитной растительности (45 проб).

На гистограмме (рисунок 5) представлено распределение значений удельной активности  $^3\text{H}$  в растительности по поперечным профилям.



а – район штольни № 176



б – район штольни № 177

Рисунок 3. Схема расположения точек отбора проб растений

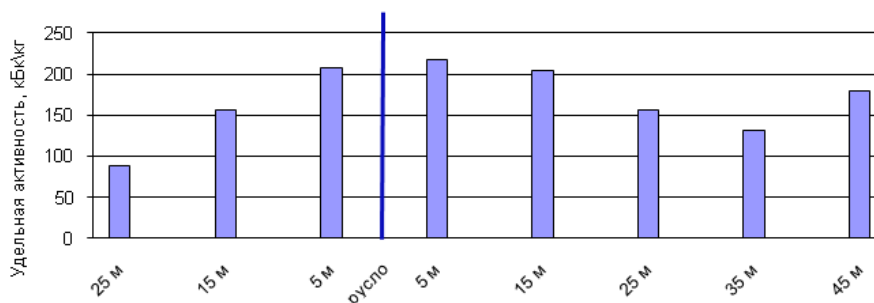


Рисунок 4. Удельная активность  $^3\text{H}$  в свободной воде растений (волоснец (*Leymus angustus*))

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСТЕНИЙ  
В КАЧЕСТВЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОДЕРЖАНИЯ  $^3\text{H}$  В ГРУНТОВЫХ ВОДАХ**

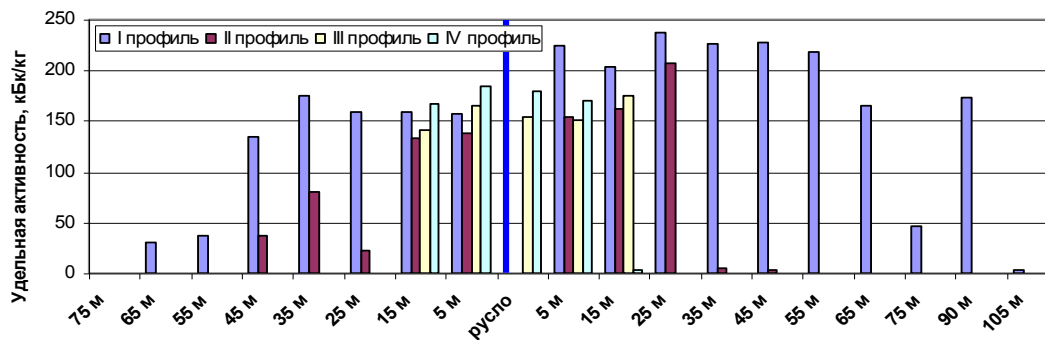


Рисунок 5. Распределение значений удельной активности  $^3\text{H}$  в свободной воде растений по поперечным профилям

Наибольшая концентрация  $^3\text{H}$  в растительности отмечается в I профиле, расположенном сразу на навалом, и достигает  $2,4 \cdot 10^5$  Бк/кг. При этом максимальные значения удельной активности в I профиле и во II профиле несколько смещены от водотока в сторону повышения правой береговой зоны. Некоторое увеличение концентрации  $^3\text{H}$  в растительности наблюдается и на повышенном участке справа от водотока в III профиле. Таким образом, можно предположить о существовании дополнительного подтока грунтовых вод содержащих радионуклид  $^3\text{H}$ , что, в свою очередь, говорит о наличии как минимум 2-х источников загрязнения  $^3\text{H}$  компонентов экосистемы водотоков штольни № 177.

На графике представлено распределение радионуклида  $^3\text{H}$  в растениях вдоль по руслу основного водотока штольни № 177, выходящего из-под навала (рисунок 6).

Максимальная удельная активность  $^3\text{H}$  в растениях вдоль русла основного водотока штольни № 177 не превышает  $1,9 \cdot 10^5$  Бк/кг, что в определенной степени подтверждает факт наличия дополнительного источника поступления  $^3\text{H}$  с грунтовыми водами, причем с более высокой концентрацией данного радионуклида. В таком случае, увеличение удельной активности  $^3\text{H}$  на расстоянии 250 м от навала, видимо, указывает на своего рода "зону слияния" данных

грунтовых вод с поверхностными водами основного водотока. Резкое понижение удельной активности  $^3\text{H}$  отмечается на расстоянии 350 м от навала и территориально совпадает с участком конечного стока весенних вод, характеризующимся сменой луговой растительности на лугово-степную. Далее по течению водотока содержание  $^3\text{H}$  в растениях постепенно снижается (до  $2,4 \cdot 10^4$ ) Бк/кг. Некоторое повышение концентрации  $^3\text{H}$  в растительности ( $8,3 \cdot 10^4$  Бк/кг) наблюдается лишь в зоне общего конечного стока в р.Узынбулак.

**Оценка содержания  $^3\text{H}$  в грунтовых водах по содержанию  $^3\text{H}$  в растениях**

Исследования по разработке методологических основ определения  $^3\text{H}$  в грунтовых водах на основании данных концентраций  $^3\text{H}$  в растениях проводились на одном из предполагаемых участков (длиной ~60 м) зоны разгрузки грунтовых вод с высоким содержанием  $^3\text{H}$  в р.Шаган, выбранном на основании данных по содержанию  $^3\text{H}$  в подрусловых водах [4].

На территории "старого" русла, расположенного на некотором повышении относительно современного русла, параллельно водотоку на расстоянии 10 м друг от друга заложено 2 профиля (по 5 точек в каждом) для отбора проб растений, воздуха и грунтовых вод (рисунок 7).

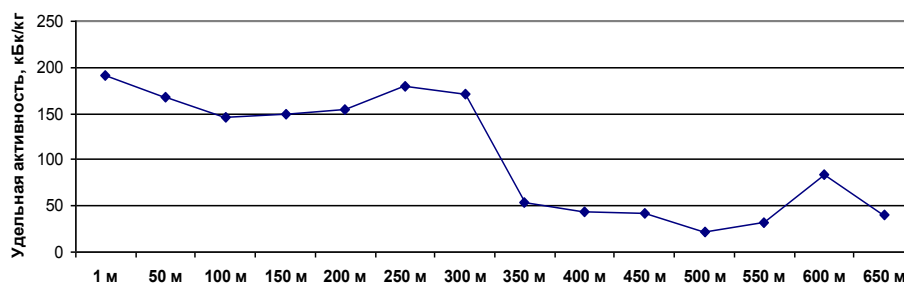


Рисунок 6. Распределение значений удельной активности  $^3\text{H}$  в свободной воде растений вдоль русла основного водотока штольни № 177

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСТЕНИЙ  
В КАЧЕСТВЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОДЕРЖАНИЯ  $^3\text{H}$  В ГРУНТОВЫХ ВОДАХ**

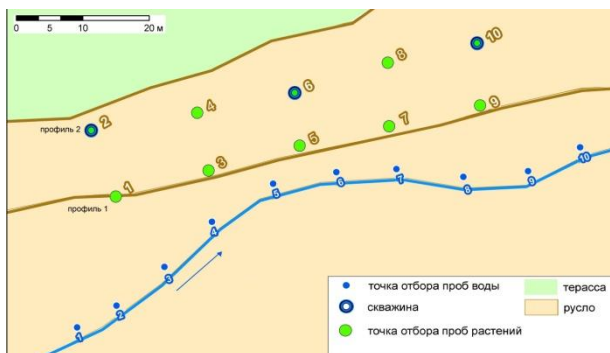


Рисунок 7. Схема расположения точек отбора

В качестве опытных растений были выбраны чий (*Achnaterum splendens*) и волоснец (*Leymus angustus*). На каждой исследовательской площадке произведен отбор проб надземной части исследуемых растений (всего 10 проб растений). Для сопряженного анализа в точках №№ 2, 6 и 10 из пробуренных скважин отобраны пробы грунтовых вод, а вдоль водотока через каждые 10 м отобраны пробы подрусловых вод. Результаты удельной активности  $^3\text{H}$  в растительности, грунтовых и подрусловых водах на различном расстоянии вдоль заложённых профилей и русла водотока представлены на графиках (рисунок 8).

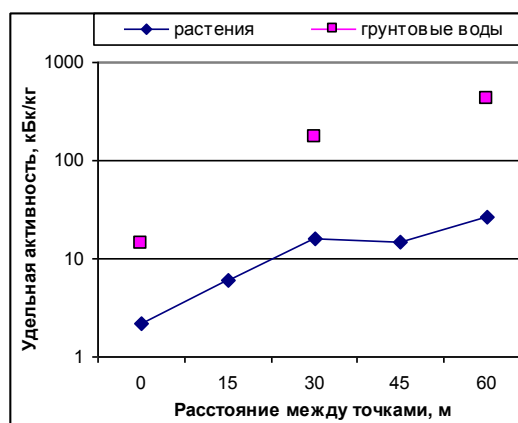
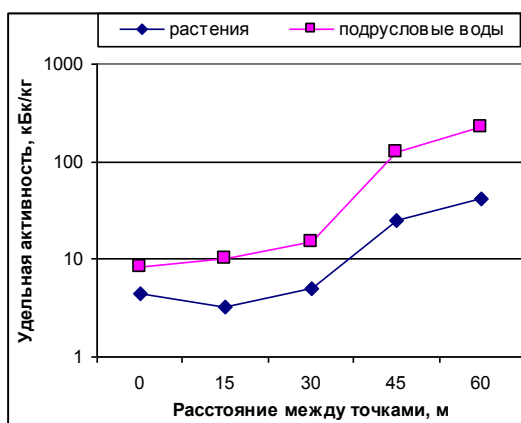


Рисунок 8. Удельная активность  $^3\text{H}$  в растениях с 1-го профиля и в подрусловых водах (а), в растениях со 2-го профиля и в грунтовых водах (б)

По результатам проведенных работ выявлено, что диапазон значений удельной активности  $^3\text{H}$  в растениях составляет 1 порядок, в грунтовых водах – 2 порядка, в подрусловых водах – 3 порядка. Однако, даже при такой разнице значений, наблюдается симбатное изменение концентрации  $^3\text{H}$  в растениях с 1-го профиля с его концентрацией в подрусловых водах, и концентрации  $^3\text{H}$  в растениях с 2-го профиля с его концентрацией в грунтовых водах. В данном случае содержание  $^3\text{H}$  в растениях со 2-го профиля, который расположен на более удаленном расстоянии от поверхностного водотока р. Шаган (относительно 1-го профиля), может в определенной степени служить неким показателем содержания  $^3\text{H}$  в грунтовых водах. Полученные данные позволяют говорить о возможности определения содержания  $^3\text{H}$  в грунтовых водах, на основании данных концентрации  $^3\text{H}$  в растениях.

В рамках изучения характера площадного распространения  $^3\text{H}$  за пределами горного массива Дегелен в долине р. Байтлес была проведена оценка содержания  $^3\text{H}$  в грунтовых водах по содержанию  $^3\text{H}$  в растениях.

Для определения содержания  $^3\text{H}$  в качестве основных исследуемых видов растений выбраны чий (*Achnaterum splendens*) и чингил (*Halimodendron*

*halodendron*) – фреатофиты, произрастающие на площадях распространения относительно неглубоко залегающих грунтовых вод. Дополнительно в отдельных точках, ввиду отсутствия данных видов, отобраны пробы степных кустарников (таволга (*Spiraea hypericifolia*) и курчавка (*Atraphaxis frutescens*)), на участке выхода поверхностных вод – смешанная проба, представленная основными составляющими лугового разнотравья. Всего отобрано 15 проб надземной части растений указанных видов. Количественные данные содержания  $^3\text{H}$  в растениях представлены в таблице 3.

По результатам проведенных работ выявлено, что в пределах исследуемой территории наблюдается повышенное содержание  $^3\text{H}$  в растениях, на отдельных участках достигающее десятков кБк/кг, зачастую превышающее концентрацию  $^3\text{H}$  в подземных водах. Наиболее показательными видами растений, как и предполагалось, оказались чий (*Achnaterum splendens*) и чингил (*Halimodendron halodendron*).

Результаты лабораторных анализов по определению концентрации  $^3\text{H}$  в грунтовых водах и свободной воде растений представлены на рисунке (рисунок 9).



**ТОПЫРАҚ СУЛАРЫНДАҒЫ  $^3\text{H}$  ҚҰРАМЫНЫҢ КӨРСЕТКІШТЕРІ  
РЕТІНДЕ ӨСІМДІКТЕРДІ ПАЙДАЛАНУ МҮМКІНДІКТЕРІН ЗЕРТТЕУ**

<sup>1</sup>Ларионова Н.В., <sup>1</sup>Лукашенко С.Н., <sup>1</sup>Субботин С.Б., <sup>1</sup>Ляхова О.Н., <sup>1</sup>Айдарханов А.О., <sup>2</sup>Бахтин Л.В.

<sup>1</sup>*ҚР ҰЯО Радиациялық қауіпсіздік және экология институты, Курчатов, Қазақстан*

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

Жұмыста түрлі экологиялық жағдайларда өсімдіктер мен табиғи сулар арасында  $^3\text{H}$  радионуклидінің қайта бөлінуінің кейбір параметрлері келтіріледі. Өсімдіктердің түрлі экологиялық тобының өкілдерін топырақ суларындағы  $^3\text{H}$  құрамының көрсеткіштері ретінде суға қатысты пайдалану мүмкіндігі қаралған. ССП аумағындағы жекелеген экосистемалар үшін топырақ суларындағы  $^3\text{H}$  шоғырлануы мен өсімдіктердегі  $^3\text{H}$  шоғырлануының өзгерісі арасындағы өзара байланыс белгіленді. Топырақ суларындағы  $^3\text{H}$  құрамының көрсеткіші ретінде өсімдіктердің белгілі бір түрлерін пайдалану мүмкіндігі расталды.

**RESEARCH OF PLANTS USAGE AS  $^3\text{H}$  CONTENT CHARACTERISTIC IN GROUND WATERS**

<sup>1</sup>N.V. Larionova, <sup>1</sup>S.N. Lukashenko, <sup>1</sup>S.B. Subbotin, <sup>1</sup>O.N. Lyakhova, <sup>1</sup>A.O. Aidarkhanov, <sup>2</sup>L.V. Bakhtin

<sup>1</sup>*Institute of Radiation Safety and Ecology NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

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

Some parameters of  $^3\text{H}$  redistribution of radionuclides between plants and natural waters in various ecological conditions are presented in this effort. The usage of different ecological groups of plants related to water as  $^3\text{H}$  content characteristic in ground waters is considered. The interrelation between  $^3\text{H}$  concentration changes in plants with  $^3\text{H}$  concentration in ground waters for separated ecosystems of STS territory is developed. The possibility of special types of plants usage as  $^3\text{H}$  parameter in ground waters is confirmed.

УДК 669.293'6'71:539.23:537.312.62

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАГНЕТРОННОГО ОСАЖДЕНИЯ НА СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА НИТРИДА НИОБИЯ

Тулешев Ю.Ж., Жаканбаев Е.А.

*Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан*

В работе проводилось исследование особенностей формирования сверхпроводящей фазы нитрида ниобия, при работе магнетронного устройства в одиночном и парном режиме. Показано влияние условий формирования на сверхпроводящие свойства покрытий. Показано что покрытие  $\delta_1$ -NbN с табличным значением параметра решетки не дает необходимой величины перехода в сверхпроводящее состояние.

### ВВЕДЕНИЕ

Синтез новых высокотемпературных сверхпроводников принадлежит к числу проблем, потенциально важных с точки зрения технического применения. Наиболее актуальным является применение высокотемпературных сверхпроводников для создания сильных магнитных полей, и в частности для удержания плазмы в термоядерных реакторах будущих поколений. В соответствии с прогнозами В.Л.Гинзбурга, материалы, состоящие из чередующихся слоев металла и диэлектрика или полупроводника, предположительно должны обладать более высокой (вплоть до комнатной) температурой критического перехода и высоким значением критического поля. Что делает перспективным их использование в сверхпроводящих магнитах научного и технологического назначения. Практический интерес для разрабатываемых технологий получения сверхпроводниковых материалов представляют также их индивидуальные особенности, такие как простота изготовления, и надежность полученных материалов. Относительная простота получения соединения нитрида ниобия связана с тем, что один из компонентов находится в газовой фазе. Использование технологии магнетронного осаждения при получении сверхпроводящих соединений на основе ниобия делает возможным получение при пониженной температуре синтеза и позволяет формировать необходимую систему зернами с размерами вплоть до нанометровых. Это позволяет получать твердые растворы с концентрациями, более высокими, чем те которые удается получить при использовании сплавной технологии. Иными словами с уменьшением размеров малых частиц меняются условия образования фаз в системе Nb-N [1]

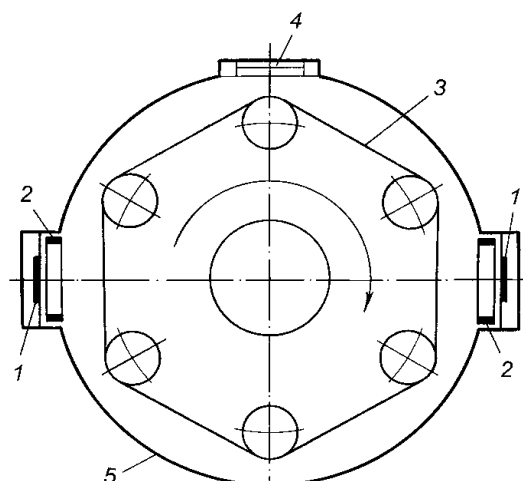
Нами в предыдущих работах был получен опыт по созданию и исследованию покрытий из нитрида ниобия и титана. Были установлены концентрационные границы существования сверхпроводящей фазы нитрида ниобия при различных концентрациях азота в плазмообразующем газе. Найдены оптимальные режимы получения сверхпроводящей фазы нитрида ниобия на ленточном носителе. Был изучен ме-

ханизм формирования нитридов ниобия при магнетронном формировании. При проведении вышеперечисленных исследований получение сверхпроводящего покрытия производилось при работе двух магнетронов и в соответствии с этим были получены параметры получения сверхпроводящего покрытия. Но оказалось, что полученные технологические параметры для получения сверхпроводящих покрытий, не применимы к случаю, когда осаждение производится с одного магнетрона. Вследствие этого необходимо было провести исследование формирования сверхпроводящей фазы нитрида ниобия, при работе магнетронного устройства в одиночном и парном режиме.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### Приготовление образцов

Для осуществления синтеза покрытий нитрида ниобия и нитрида титана использовалась установка для магнетронного напыления, включающая вакуумную камеру, вакуумную систему и систему напуска газа. В вакуумной камере смонтированы два магнетрона планарного типа постоянного тока. Магнетроны разнесены диаметрально на сторонах вакуумного колпака и размещены соосно друг другу. Схема конструкции камеры представлена на рисунке 1. Внутри камеры расположено устройство перемещения карусельного типа с возможностью изменения скорости вращения, на котором крепится ленточная подложка. Катодные узлы магнетронов, содержащие магнитную систему и мишени, охлаждаются проточной водой. Специально разработанный двухканальный блок питания магнетронов имеет мощность на каждом из каналов до 1 кВт и позволяет плавно изменять мощность на каждом из магнетронов отдельно. Таким образом, магнетронная установка имеет современные высокоэффективные магнетронные распылители и адаптированные к ним источники высокого напряжения. При осаждении использовалась аргон – азотная смесь с концентрацией азота 28 об % азота.



1 – мишень; 2 – анод магнетрона;  
3 – барабан; 4 – смотровое окно; 5 – корпус

Рисунок 1. Схема расположения несущей  
ленты в вакуумной камере

#### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Система Nb-N характеризуется наличием следующих соединений:  $\beta$ -Nb<sub>2</sub>N,  $\gamma$ -Nb<sub>4</sub>N<sub>3</sub>,  $\delta_1$ -NbN,  $\delta$ -NbN,  $\epsilon$ -NbN. Фазовые равновесия в системе носят сложный, до конца не определенный характер [2].

Из всех фаз системы Nb-N сверхпроводящими свойствами при T = 15 К обладает фаза  $\delta_1$ -NbN с г.д.к.-решеткой типа NaCl (a = 0,4373 - 0,4393 нм). Синтез и осаждение тонкого слоя этой фазы на поверхность образцов можно успешно проводить с использованием разработанной и изготовленной нами установки. [2]

Получение фазы  $\delta_1$ -NbN стехиометрического состава зависит от многих факторов, в том числе от содержания азота в газовой фазе и количества распыляемого ниобия. Эти параметры определяются мощностью, подведенной к магнетрону, давлением рабочего газа, а также положением и перемещением подложки относительно потока плазмы [1].

Перед напылением поверхность подложки подвергали очистке аномальным тлеющим разрядом в течение 20 мин. с подачей очищенного аргона при давлении  $1 \cdot 10^{-2}$  Па.

Формирование всей толщины покрытия осуществляли нанослоями при многократном пересечении каждым участком подложки потоков плазмы. После завершения процесса нанесения покрытия и отключения мощности давление в камере повышали до атмосферного. Ленту с нанесенным покрытием снимали с карусельного устройства и подвергали физическим и физико-химическим исследованиям.

При проведении испытаний по разработке процесса формирования сверхпроводящего слоя установлено, что для обеспечения нужного соотношения между ниобием и азотом в напыляемой пленке необходимо точное поддержание в допустимых пределах техно-

логических параметров, влияющих на процесс напыления: тока магнетрона, давления в камере, скорости вращения карусельного устройства, напряжения смещения, концентрации азота в рабочем газе. При повышении тока магнетрона происходит увеличение выноса распыляемого с мишени металла, а также меняется вероятность протекания реакции с азотом и место протекания реакции: от поверхности мишени до поверхности подложки. С количеством распыленного металла прямо связан такой технологический параметр, как давление газа в камере. Избыток газа приводит к появлению обогащенных азотом фаз  $\epsilon$ -NbN и  $\delta'$ -NbN. При недостатке газа образуются бедные азотом фазы  $\beta$ -Nb<sub>2</sub>N и  $\gamma$ -Nb<sub>4</sub>N<sub>3</sub>. И только при строгом соответствии количества распыляемого металла количеству участвующего в процессе синтеза газа синтезируется фаза  $\delta_1$ -NbN. При этом количество подаваемого газа должно соответствовать мощности откачной системы.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее при проведении испытаний, технологии синтеза сверхпроводящей фазы нитрида ниобия, применительно к магнетронам планарного типа разработанной конструкции были установлены оптимальные параметры осаждения: суммарная мощность магнетронов, рабочее давление в камере, скорость перемещения подложки, концентрация азота. Получены образцы с покрытиями из нитрида ниобия, на различных типах подложек: Al,  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cu, Si(mono). Были определены оптимальные режимы получения сверхпроводящего покрытия с табличными характеристиками. Ввиду отсутствия на тот момент собственного криогенного поста в лаборатории, криоиспытания производились в г.Черноголовка (Россия). Но с недавнего времени был приобретен неработающий криогенный насос НВК-3,2А-Р. Был произведен ремонт насоса, заключавшийся в определении причины неисправности, разборки исполнительного механизма охлаждающего устройства, взаимной шлифовки штока движения поршней первой и второй ступени охлаждения и последующей сборки механизма. Испытания насоса после ремонта показали, что как криогенный пост он способен доводить температуру исследуемого образца до 15,5-16 К. Данная температура является достаточной для наблюдения крит.перехода на образцах с пленочным покрытием Nb<sub>3</sub>Al, которые имеют T<sub>c</sub>=16,5 К. Датчиком температуры является термистор марки ТВО-0,125 номиналом 1 кОм. Калибровка температурной шкалы произведена по трем точкам: температуре крит.перехода, температуре кипения жидкого азота и комнатной температуре. Для упрощения эксплуатации криогенного поста корпус вакуумного насоса был заменен на вакуумную камеру, адаптированную к условиям исследования криогенных свойств образцов. Определение электрофизических свойств производится с помощью автома-



**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАГНЕТРОННОГО  
ОСАЖДЕНИЯ НА СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА НИТРИДА НИОБИЯ**

тизированного комплекса на базе LabView. Результаты в виде температурной зависимости электросопротивления от температуры выводятся на экран дисплея и фиксируются компьютером. Далее после окончательной доработки криостата, нами была получена температура охлаждения образцов  $T_c=9,5$  К. Что позволило самим производить измерения полученных покрытий Nb-N с большей эффективностью. И в результате этого нами была достигнута температура критперехода сверхпроводящего покрытия Nb-N – 16 К. Но это все было получено при работе двух диаметрально расположенных относительно друг друга магнетронов. А для получения слоистой структуры типа: сверхпроводник – несверхпроводник необходимо было заменить ниобий на одном магнетронном устройстве на титан. Для отработки режимов получения сверхпроводника при работе одного магнетрона было произведено контрольное осаждение нитрида ниобия с одного магнетрона. По результатам рентгеноструктурного анализа полученное покрытие соответствовало сверхпроводящей фазе  $\delta_1$ -NbN. Но при проведении криоиспытаний температура перехода в сверхпроводящее состояние оказалась значительно ниже ожидаемой. Так как основными параметрами регулировки структуры полученных покрытий являлись мощность подаваемая на магнетрон и состав аргон-азотной смеси. То нами было решено что при работе одного магнетрона в отличии от парного режима, существует избыток газа который приводит к образованию паразитной не-

сверхпроводящей фазы нитрида ниобия. Что и приводит к снижению величины перехода в сверхпроводящее состояние. Впоследствии был произведено исследование которое должно было определить оптимальные технологические параметры для получения необходимого сверхпроводящего покрытия. В результате проведенных работ были получены следующие данные – таблица 1.

Невозможность достичь необходимой величины критперехода при работе одного магнетрона в отличии от парного режима работы видимо обусловлено тем что при работе двух магнетронов необходимо большее количество азота в азот содержащей плазме. Увеличение потока металла при осаждении и уменьшение концентрации азота в случае с одним магнетроном, видимых результатов не принесли. По-видимому, имеет место влияния темного пространства на процесс нитрирования покрытий и как следствие этого формирование нитрида происходит неравномерно, что существенно ухудшает свойства полученных покрытий. Ввиду того, что магнетронная установка имеет ограничения по подаваемой мощности и по давлению газа, что делает невозможным дальнейшее варьирование по мощности и по газу, то для получения слоистого покрытия сверхпроводник – несверхпроводник, планируется произвести модернизацию камеры, путем установки двух дополнительных магнетронов, что должно исключить влияние темного пространства на процесс нитрирования.

*Таблица 1. Результаты крит. испытаний образцов полученных при различных мощностях*

Название	Мощность Вт	$T_c$ (2 магнетрона)	$T_c$ (1 магнетрон)
NbN 17-13	146	12,888	11,818
NbN 17—12	147	16.36	13.478
NbN 17—8	148	11.28	10.304
NbN 17—10	150	12,8	Нет перехода
NbN 17—11	151	11.03	Нет перехода
NbN 17—9	155	Нет перехода	Нет перехода
NbN17-19	156	Нет перехода	Нет перехода
NbN 17-20	157	Нет перехода	Нет перехода
NbN 17-21	152	13,4	11,04
NbN 17-21(2)	153	14,1	12,5
NbN 17-22	147	13	11,7
NbN 17-23	146	13,1	11,8
NbN 18-24	145	14,07	12,9
NbN 18-25	144	12,81	10,42
NbN 18-27	150	12,7	10,0
NbN 18-26	143	12,7	10,33
NbN 18 22	170	Нет перехода	Нет перехода
NbN 18 21	165	12.9	Нет перехода
NbN 18,20	160	Нет перехода	Нет перехода
NbN 18,29	147	Нет перехода	Нет перехода

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Жаканбаев, Е.А. Структура и свойства покрытий из нитрида ниобия при ионно-плазменном формировании. /Жаканбаев, Е.А. [и др.]. // Вестник НЯЦ РК / Вып. 1, 2007г. с. 18-22.
2. Тулеушев, А.Ж. Ионно-плазменное оборудование основных и вспомогательных процессов в технологиях изготовления пленочных материалов / А.Ж. Тулеушев [и др.]. // V всерос. семинар Пробл. теорет. и прикл. электронной и ион. оптики. – М. – 2001. – С. 54-56.
3. Барабаш О.М., Коваль Ю.Н. Кристаллическая структура металлов и сплавов. Справочник. К.: Наукова думка. 1986 г. 598 с.



**МАГНЕТРОНДЫҚ ТҮНДЫРУ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ЫҚПАЛЫН  
ЖАСАУ ЗЕРТТЕУІ НИОБИЙ НИТРИД АСА ӨТКІЗГЕН ҚАСИЕТТЕРІ**

Түлеушев Ю.Ж., Жаканбаев Е.А.

*ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан*

Жұмыста ниобий нитрид аса өткізген фазалары құру ерекшеліктерінің зерттеуі өткізілді, жеке және қос тәртіпте магнетрондық құрылғы жұмысы жанында. Құру шарттарының ықпалын жасауы көрсетілген жабулардың аса өткізген қасиеттері. Асу қажетті мөлшерлері шарбақ параметрі кестелік мағынасымен не көрсетілген күй-жағдай аса өткізгенейік.

**RESEARCH OF INFLUENCE OF PARAMETRES MAGNETRON  
SEDIMENTATION ON SUPERCONDUCTING PROPERTIES OF NIOBIUM NITRIDE**

Y.Zh. Tuleushev, Y.A. Zhakanbayev

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

In work research of features of formation of a superconducting phase of NbN was carried out, at work magnetron sputtering devices a single and pair mode. Influence of conditions of formation on superconducting properties of coverings is shown. It is shown that the covering  $\delta_1$ -NbN with tabular value of parametre of a lattice does not give necessary size of transition in a superconducting condition.

УДК 621.039.5.001.24

**ИЗМЕНЕНИЕ ВО ВРЕМЕНИ ТРЕХМЕРНОГО НЕЙТРОННОГО ПОЛЯ РЕАКТОРА ИГР****Котов В.М., Курпешева А.М.***Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

Разработана методика, основанная на чередовании нейтронно-физических и теплофизических расчетов реактора, позволяющая учесть эффекты неравномерности нагрева отдельных частей кладки. Приводятся используемые модели и результаты расчетов полей температур и изменения отношения мощности, выделяемой в ТВС, установленной в ЦЭК, к мощности кладки реактора ИГР.

**ВВЕДЕНИЕ**

Для исследовательской деятельности, которая ведется на реакторе ИГР [1], типичными являются условия, когда экспериментатор предоставляет экспериментальное устройство и задает режим его испытаний. Главной составляющей такого режима является закон изменения нейтронной мощности, который в ходе эксперимента необходимо реализовать в облучательном устройстве.

Опыт эксплуатации показывает, что отношение "мощность реактора – мощность в облучательном устройстве" зависит от особенностей каждого нового экспериментального устройства (конструктивное исполнение и используемые материалы), установка которого ведет к изменению критической конфигурации активной зоны и характеристик органов регулирования.

В ходе работы реактора ИГР уран-графитовая активная зона разогревается до высокой температуры. Неравномерное распределение нейтронов в объеме кладки приводит к неравномерности роста температуры элементов кладки. Соответственно, создаются предпосылки изменения отношения нейтронных потоков в различных частях реактора и связанных с ним устройств, что и отмечалось в ряде пусков реактора [2]. Была показана неравномерность поля нейтронов в районе расположения датчиков (до нескольких десятков процентов). Основной вес исследования эффектов неравномерности ложится на расчетные работы, поскольку экспериментальные работы, в связи с отсутствием доступа к отдельным элементам кладки, практически невозможны.

В работе [3] предложен подход к проведению подобных расчетов, основанный на последовательном проведении нейтронно-физических и теплофизических расчетов, в которых проводится детальный контроль неравномерности нагрева отдельных частей кладки. Активная зона в таких расчетах разбивается на большое количество участков с достаточно близкими энерговыделениями и температурами внутри этих участков.

В ходе таких расчетов могут быть получены необходимые характеристики, как от времени пуска, так и от закономерности движения органов регулирования.

**ОТРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТОВ**

Реактор ИГР, как правило, работает в одном из двух режимов – нерегулируемой самогасящейся вспышкой или режиме с регулируемым импульсом. В режиме импульса в отличие от вспышки проводят перемещения группы из восьми компенсирующих стержней по заранее заданному алгоритму. В режиме импульса с максимальным энерговыделением, когда топливо в центре активной зоны разогревается до ~1400 К и, следовательно, необходима максимальная компенсация потери реактивности, группы компенсирующих стержней перемещается на весь ход. Именно в этом режиме начинают играть заметную роль физические эффекты, не проявляющие себя в достаточной степени в режиме короткой ~ (0,1-1) с вспышки, в течение которой стержни не перемещаются. Так, в регулируемых импульсах, когда одновременно изменяются температура уран-графитового топлива и положение стержней управления, заметно меняется функция распределения нейтронного потока по высоте активной зоны [4].

В настоящей работе для упрощения расчетов использовались характеристики перемещения органов регулирования, полученные в реальных пусках, и соответствующие им изменения мощности реактора. Для таких расчетов были выбраны пуски 164Ф-14 с пустым ЦЭК [3] и 164Ф-24 с загруженным ЦЭК. Максимальная температура кладки реактора ИГР в пуске 164Ф-24 составила 1200 К.

Диаграммы изменения мощности реактора и передвижения стержней КС1-КС8 и ПС1 представлены на рисунке 1. Данный пуск характеризуется высоким энерговыделением в активной зоне – 4,1 ГДж (при максимальном энерговыделении в реакторе 5,2 ГДж).

Расчетная модель реактора ИГР с загруженным экспериментальным устройством в ЦЭК представлена на рисунке 2. Активная зона реактора была разбита на 88 ячеек. Экспериментальное устройство с многочисленными стенками и материалами было представлено в расчете гомогенизированным корпусом с размещенными внутри него 12-ю твэлами. Центр активной части твэлов совпадает с центром активной зоны.

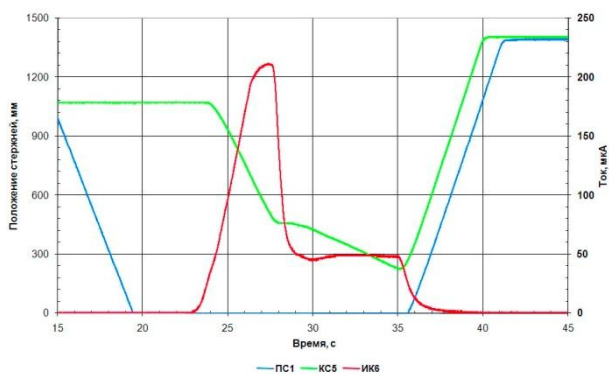


Рисунок 1. Диаграмма изменения мощности и хода стержней в пуске 164Ф-24

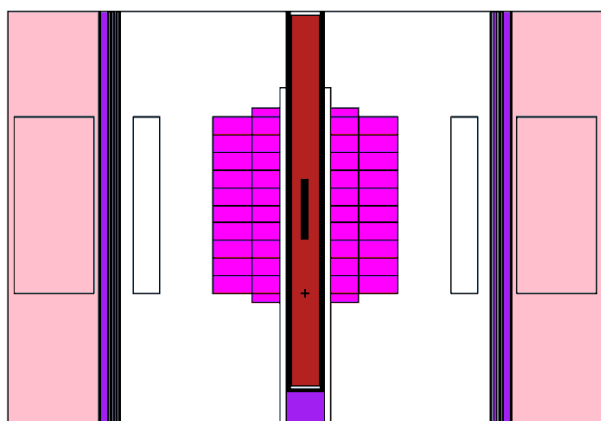


Рисунок 2. Расчетная модель реактора ИГР с экспериментальным устройством в ЦЭК

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Диаграмма изменения мощности реактора (с 24 секунды по 37 секунду) была разделена на 14 шагов. Для первого шага диаграммы был проведен нейтронно-физический расчет с соответствующей конфигурацией активной зоны. Начальная температура кладки принималась равной 300 К. Результатами нейтронно-физического расчета являлись энерговыделения в каждой из 88 ячеек. Приращения температуры в ячейках определялись по известным энерговыделениям в результате теплофизического расчета. Найденные конечные температуры ячеек являлись начальными условиями для последующего нейтронно-физического расчета и т.д. до последнего шага диаграммы. Результаты распределений температур по высоте активной зоны для каждого шага диаграммы приведены на рисунке 3.

Распределение тепловых нейтронов по высоте кладки реактора ИГР для загруженного ЦЭК является более равномерным, чем в случае с пустым ЦЭК [3], вследствие того, что экспериментальное устройство закрывается собой центральный канал и пре-

пятствует утечке нейтронов в верхней половине реактора. По мере возрастания температуры топлива и вывода регулирующих стержней максимум распределения стремится к уровню центра активной зоны.

Разработанная методика последовательных нейтронно-физических и теплофизических расчетов учитывает влияние неравномерности разогрева кладки активной зоны, движения органов регулирования и загрузки ЦЭК на распределение нейтронных полей, также позволяет рассчитать распределения температуры в любом эксперименте и определить изменение соотношения мощностей в экспериментальном устройстве и реакторе в течение эксперимента (рисунок 4).

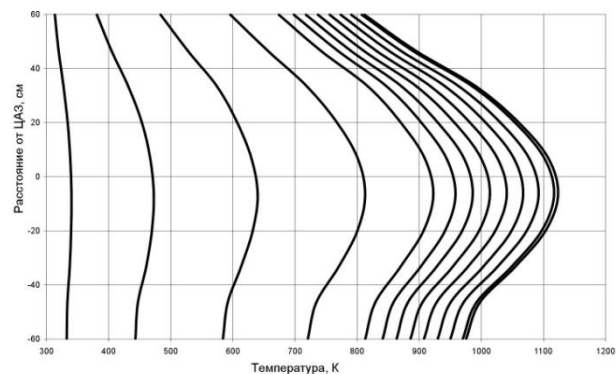


Рисунок 3. Распределение температуры по высоте в III четверти НЧК

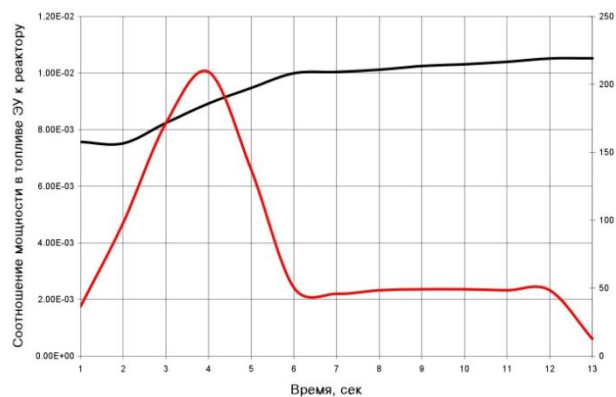


Рисунок 4. Изменение мощности реактора и отношения  $W_{\text{ЭУ}}/W_{\text{р}}$  в ходе пуска

Описанный методический подход позволил получить качественно новые расчетные данные хорошо согласуемые с данными экспериментов и позволяющие повысить уровень подготовки к испытаниям новых изделий в канале реактора.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Импульсный графитовый реактор ИГР / И. В. Курчатов [и др.] // Атомная энергия. – 1964. – Т. 17, вып. 6. – С. 463–474.
2. Особенности поля тепловых нейтронов в экспериментальном канале ИГР / Н. В. Горин [и др.] // Атомная энергия. – 2001. – Т. 90, вып. 4. – С. 251–256.
3. Котов, В. М. Изменение эффективности датчиков нейтронного потока в ходе пусков реактора ИГР / В. М. Котов, А. М. Курпешева // Вестник НЯЦ РК. – 2007. – вып. 3 (31). – С. 76–79.
4. Аппроксимация энергораспределения в активной зоне по показаниям вне реакторных датчиков / А. Н. Камышан [и др.] // Атомная энергия. – 1991. – Т. 71, вып. 6. – С. 3–6.

**ИГР РЕАКТОРЫНЫҢ ҮШ ӨЛШЕМДІ НЕЙТРОНДЫ АҒЫМ УАҚЫТЫНДА ӨЗГЕРУІ**

**Котов В.М., Курпешева А.М.**

*ҚР ҰАО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан*

Құрылыстың бөлек бөлшектерін қыздыру біркелкісіздік әсерін есепке алуды рұқсат ететін, реактордың нейтронды-физикалық және жылу физикалық есептемелерін алмасуына негізделген әдістеме әзірленген. ИГР реакторының құрылыс қуатына ОЭК орнатылған, ЖШЖ шығарылатын қуат қатынасын өзгеруін және температура жиек есептер нәтижелері және пайдаланатын модельдер келтіріледі.

**CHANGES IN TIME OF THE THREE-DIMENSIONAL NEUTRON FLUX OF IGR REACTOR**

**V.M. Kotov, A.M. Kurpesheva**

*Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

The technique, based on the alternation of neutron and thermal calculations of reactor, which allows to take into account the effects of uneven heating of some parts of stacking, is developed. Some used models and calculations of temperature fields and changing the power ratio generated in FA, as set in CEC for power of IGR reactor stacking.

УДК 550.348

## ИСТОРИЧЕСКИЕ СЕЙСМОГРАММЫ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ ДЛЯ РАЗВИТИЯ НОВЫХ ПОДХОДОВ В РАСПОЗНАВАНИИ

Узбеков А.Н., Соколова И.Н.

*Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

Приведены результаты работ по переводу исторических аналоговых сейсмограмм с записями ядерных взрывов в цифровую форму. Разработана технология оцифровки, собраны данные об источниках ядерных взрывов и станциях регистрации за период с 1961 г. по 1985 г., оцифровано более 2000 архивных сейсмограмм.

### ВВЕДЕНИЕ

В 1996 году Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) был открыт для подписания, и с этого времени начала создаваться международная система мониторинга, в задачи которой входит обнаружение и распознавание ядерных взрывов, произведенных в разных средах: атмосфере, под водой и под землей [1, 2]. После 1996 г. было произведено только 7 ядерных взрывов, что, безусловно, недостаточно с точки зрения отработки методик их распознавания. Поэтому необходимо привлекать исторические сейсмограммы ядерных испытаний, накопленные в архивах различных организаций, начиная с середины прошлого столетия. Это могут быть как цифровые, так и аналоговые записи.

В Советском Союзе первые испытания ядерного оружия начались в 1949 году. В этот период на территории Казахстана непрерывные сейсмические наблюдения проводились станциями, расположенными в основном на территории Северного Тянь-Шаня. На северотяньшаньских станциях была установлена аппаратура с усилением  $V=20000-40000$  [3], задачей которых был мониторинг землетрясений юга и юго-востока Казахстана. Другие сейсмические станции входили в сейсмическую сеть Комплексной сейсмологической экспедиции (КСЭ), созданной Институтом физики Земли (ИФЗ) АН СССР в г. Талгар. В задачи этой сети входили не только мониторинг землетрясений и изучение строения литосферы, но и обнаружение, распознавание ядерных испытаний на региональных и телесеismicических расстояниях. КСЭ было открыто большое количество сейсмических станций на территории всего бывшего Советского Союза, как стационарных, так и временных. Все станции были оснащены чувствительными приборами типа СКМ-3, КСЭ и РВЗТ с усилением  $V$  от 40 000 до 120 000 [4]. Станции КСЭ регистрировали даже очень слабые ядерные взрывы с магнитудой  $m_b=4.0$ , произведенные на значительных расстояниях.

### ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

Особенностью сейсмических станций, расположенных на территории Казахстана и на прилегающих территориях, является то, что они расположены на региональных расстояниях относительно всех ядер-

ных испытательных полигонов Азии. Кроме того, большинство из этих станций расположены в местах с низким уровнем сейсмических шумов, что позволило регистрировать даже слабые подземные ядерные взрывы на телесеismicических расстояниях. Поэтому задача оцифровки аналоговых сейсмограмм и перевода оцифрованных данных в современный формат, удобный для хранения, использования и обмена данными в настоящее время очень актуальна. Оцифрованные сейсмограммы могут с успехом использоваться не только для разработки новых методов идентификации ядерных взрывов, но и для совершенствования и тестирования новых технологий мониторинга скрытых ядерных испытаний, для калибровки станций Международной сети мониторинга ОДВЗЯИ, для изучения строения литосферы и астеносферы в районах проведения ядерных испытаний, для изучения геодинамики и последствий воздействия подземных ядерных взрывов на среду.

На рисунке 1 показано расположение сейсмических станций, работавших в разные годы и регистрировавших сейсмические сигналы на фотобумагу. Сейсмограммы этих станций хранятся в основном в архивах СОМЭ МОН РК (Сейсмологическая опытно-методическая экспедиция), ИГИ НЯЦ РК, КСЭ ИФЗ РАН (Комплексная сейсмологическая экспедиция Института физики Земли).

К сожалению, не все типы ядерных взрывов регистрируются сейсмическими приборами одинаково хорошо. Сейсмический эффект ( $\eta=E_c/E_0$  – доля сейсмической энергии  $E_c$  от общей энергии  $E_0$  взрыва) существенным образом различается при проведении взрывов в разных средах. При воздушных и контактных взрывах лишь небольшая часть энергии выделяется в виде сейсмических волн (таблица 1 из [5]).

В связи с этим для оцифровки были выбраны, в первую очередь, сейсмограммы самых сильных мультимегатонных воздушных ядерных взрывов и подземных ядерных взрывов. На рисунке 2 показано расположение ядерных взрывов, записи которых были использованы для оцифровки.

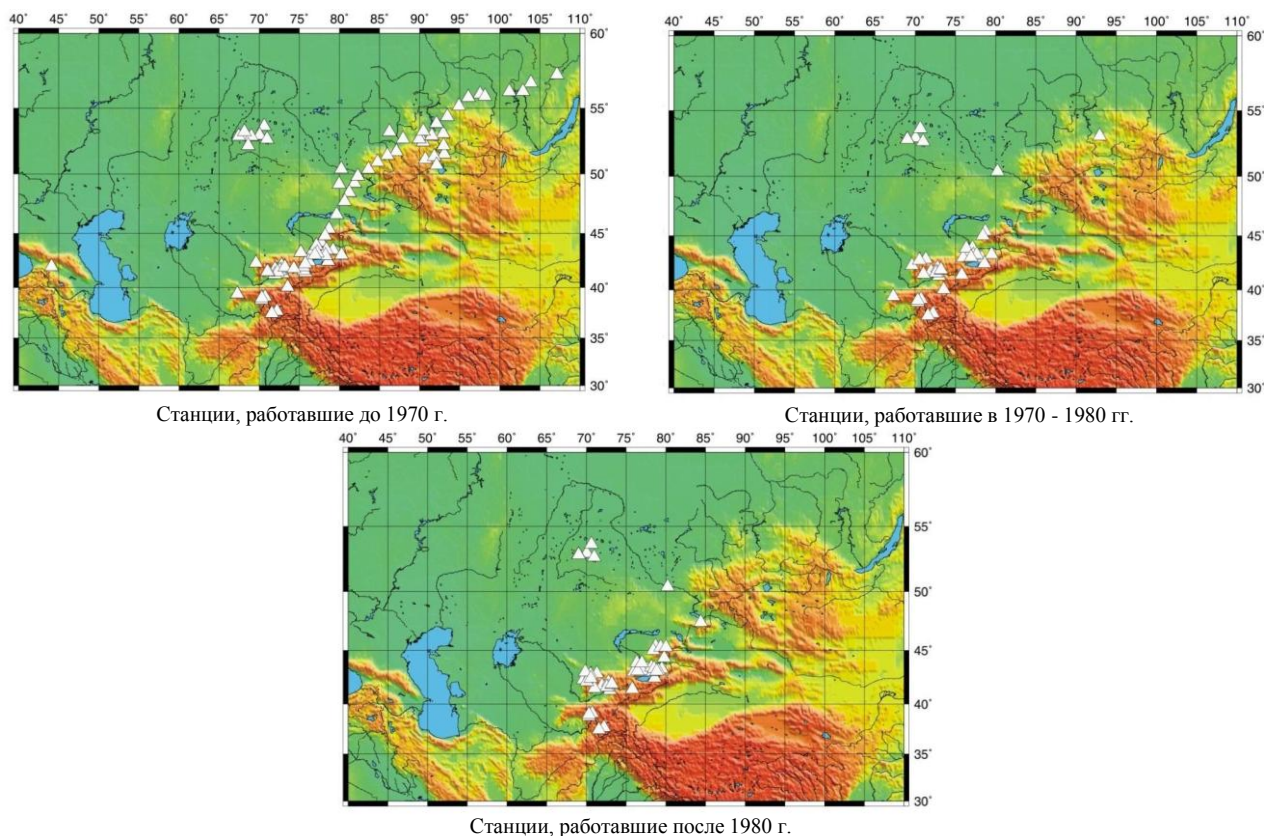


Рисунок 1. Расположение сейсмических станций с записью сейсмограмм на бумажные носители

Таблица 1. Оценка сейсмического эффекта по объемным волнам для ядерных взрывов, проводимых в различных условиях

Условия проведения	Высота или глубина, км	$\eta$ , %
Воздушный	в приземном слое атмосферы	$1.3 \cdot 10^{-5}$
Контактный	0	$1.3 \cdot 10^{-3}$
Подземный (туф, гранит)	0.3 - 0.7	$1.1 \cdot 10^{-1}$
Подводный	0.6	4

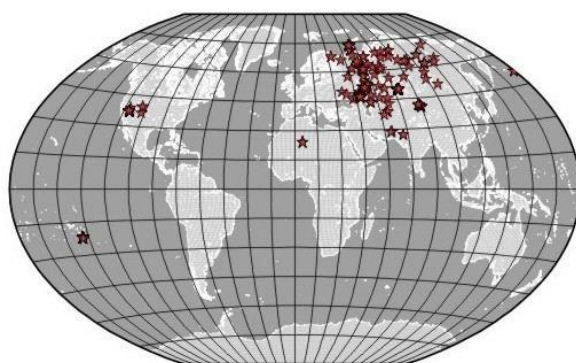


Рисунок 2. Расположение эпицентров ядерных взрывов, записи которых были выбраны для оцифровки

#### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

В качестве программного обеспечения использован программный комплекс “NXSCAN” [6], который в полуавтоматическом режиме позволяет оцифровывать предварительно отсканированные сейсмограммы. Сканер обеспечивает разрешение 400 отсчетов/дюйм, или приблизительно 16 отсчетов/мм. Большинство использованных записей, зарегистри-

рованных каналом СКМ-3 (на фотобумаге), имело развертку 120 мм/мин, редко 60 - мм/мин. Сейсмограммы оцифрованы с частотой 40 Гц. Полоса пропускания канала СКМ-3 – от 0.7 до 10 Гц. Можно считать, что реально удавалось использовать для анализа частоты до 6 Гц. Фрагменты аналоговых сейсмограмм, оцифрованные программой NXSCAN, сохранены в формате SAC (Seismic Analysis Code)



[7], после чего они преобразованы в формат CSS 3.0 (Center for Seismic Studies v.3.0) [8]. Из оцифрованного материала создана база данных, каждая запись в которой содержит следующие таблицы CSS 3.0: wfdisc, site, sitechan, assoc, origin. На рисунке 3 приведена структура технологической линии по сканированию и переформатированию архивных бумажных сейсмограмм.

Проведено тестирование результатов оцифровки. Оцифрованные сейсмограммы имеют хорошее согласование с оригиналом как визуально, так и по кинематическим и динамическим параметрам. В таблице 2 приведены результаты сопоставления времен

вступления Р волн, замеренных на аналоговых и оцифрованных сейсмограммах.

Точность снятия времен, зависящая от четкости вступлений фаз, скорости развертки сейсмограммы, в среднем составила  $\pm 7\%$ , точность оценок амплитуд для заглубленного канала составила  $\pm 10\%$ , для чувствительного канала  $\pm 5\%$ .

В настоящее время оцифрованы сейсмограммы, записанные до 1985 г. На рисунке 4 приведен пример оригинала и результатов оцифровки сейсмограммы ядерного взрыва 02/01/1979,  $t_0=04:13:00.2$ ,  $\varphi=50.101^\circ$ ,  $\lambda=78.863^\circ$ ,  $mb=5.4$ .

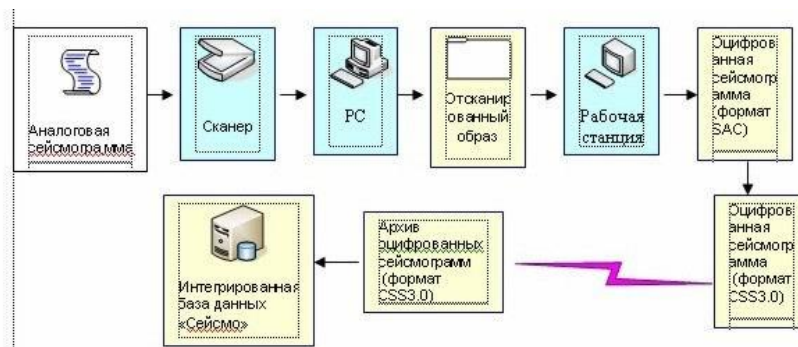
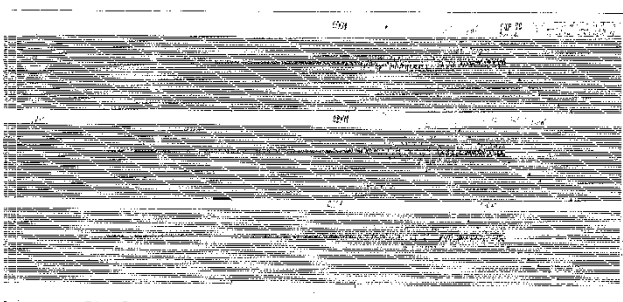


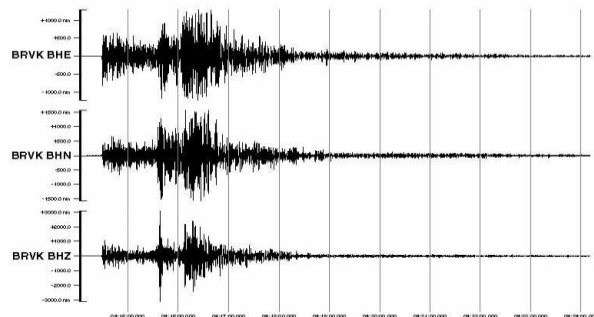
Рисунок 3. Структура технологической линии по сканированию и переформатированию архивных сейсмограмм

Таблица. 2. Результаты сопоставления времен вступления Р-волн, замеренных на аналоговых и оцифрованных сейсмограммах

Станции	Развертка мм/с	iP	eP	eeP	После оцифровки
Все станции КСЭ, СОМЭ МОИ РК	120	0.1 с	0.5 с	> 0.5 с	$\pm 2\%$
KURK, SEM (СКМ), NVS (СКМ)	60	0.2 с	1 с	> 1 с	$\pm 5\%$
SEM (СК)	30	0.4 с	2 с	> 2 с	$\pm 10\%$
NVS (ЧИСС)	15	0.8 с	4 с	> 4 с	$\pm 10\%$



а – аналоговая архивная запись на фотобумаге



б – результат оцифровки. Станция Боровое

Рисунок 4. Пример оцифровки сейсмограммы ядерного взрыва, произведенного на СИП (02/01/1979,  $t_0=04:13:00.2$ ,  $\varphi=50.101^\circ$ ,  $\lambda=78.863^\circ$ ,  $mb=5.4$ )

### РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦИФРОВКИ ИСТОРИЧЕСКИХ СЕЙСМОГРАММ

База данных в формате CSS3.0 содержит более 2000 сейсмических записей ядерных взрывов, произведенных на различных испытательных полигонах мира. На рисунке 5 приведена диаграмма распределения количества оцифрованных сейсмограмм относительно 8 известных ядерных полигонов. Ядерные

полигоны находятся на разных эпицентральных расстояниях от станций, кроме того, геофизическая среда и условия проведения взрывов существенно образом отличаются. В связи с этим, для каждого полигона существует различный магнитудный порог регистрации, причем для каждой наблюдательной станции он различный.

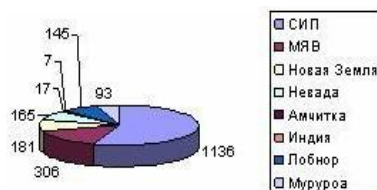


Рисунок 5. Диаграмма количества оцифрованных сейсмограмм по полигонам

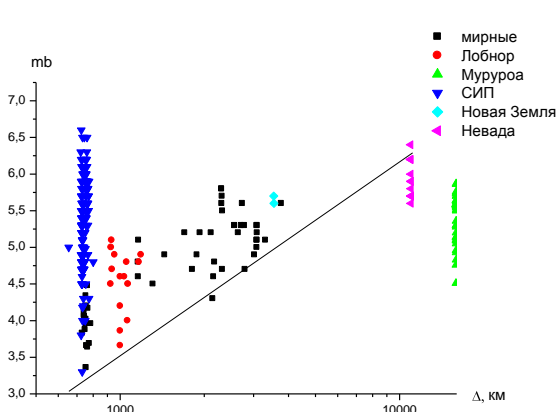


Рисунок 6. Распределение оцифрованных сейсмограмм, зарегистрированных станцией Талгар, по магнитудам событий и расстояниям

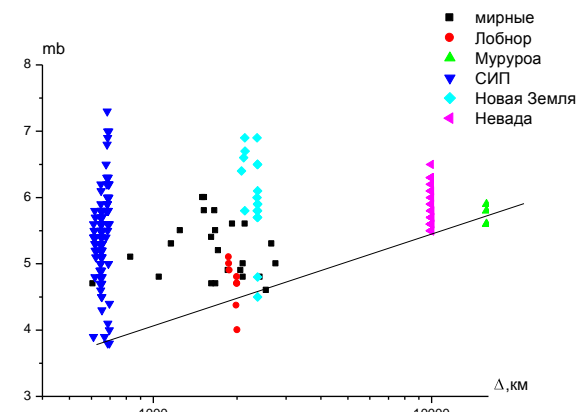


Рисунок 7. Распределение оцифрованных сейсмограмм, зарегистрированных станцией Боровое, по магнитудам событий и расстояниям

На рисунке 6 показано распределение оцифрованных сейсмограмм по магнитудам и расстояниям для станции Талгар, расположенной на Северном Тянь-Шане. Из рисунка следует, что станция Талгар регистрировала события на полигоне СИП, начиная с магнитуды  $mb=3.3$ , на полигоне Лобнор – начиная с магнитуды  $mb=3.7$ . Для мирных ядерных взрывов пороговая магнитуда  $mb=3.4$ , для полигона Невада -  $mb=5.7$ , для полигона Муруроа -  $mb=4.8$ .

Другие значения пороговых магнитуд определены для станции Боровое, расположенной в Северном Казахстане (рисунок 7). Так, при регистрации событий, происходивших на полигоне СИП, это значение  $mb=3.3$ , на полигоне Лобнор -  $mb=4$ . Для мирных ядерных взрывов пороговая магнитуда  $mb=4.6$ , для полигона Невада -  $mb=5.5$ , для полигона Муруроа -  $mb=5.6$ , для полигона Новая Земля -  $mb=4.5$ .

Видно, что в целом обе станции являются достаточно чувствительными, но относительно полигонов Новая Земля, Невада лучшей является станция Боровое, а для полигона Лобнор и промышленных взрывов лучшей является станция Талгар.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана и постоянно пополняется уникальная база данных сейсмограмм ядерных взрывов в формате CSS3.0 с использованием архивных записей. Уже в настоящее время эта база данных активно используется для решения различных исследовательских задач сейсмологии: для сейсмического распознавания ядерных взрывов и землетрясений; изучения пространственно-временных вариаций поля поглощения поперечных волн; изучения длиннопериодных вариаций скоростей сейсмических волн; построения региональных годографов сейсмических волн; изучения последствий влияния мощных взрывов на среду.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ). – Вена: Подготовительная комиссия Организации ДВЗЯИ. - 2001. – 165 с.
2. Суarez, Ж. Международная система мониторинга – ее цели и состояние / Ж. Суarez // Вестник НЯЦ РК, 2003. – вып. 2. – С. 25 – 33.
3. Mikhailova, N.N. Present Status of the Network for Seismic Observation in Kazakhstan. / N.N Mikhailova., A.K. Kurskeev // Journal of earthquake prediction research. - 1995. – v. 4, N 4, – P. 497 – 506.
4. Аранович, З.И. Основные типы сейсмометрических приборов / З.И. Аранович [и др.] // Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР. - М.: Наука, 1974. – С. 43 – 117.
5. Кедров, О.К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний/ О.К. Кедров, - М.: ИФЗ РАН, 2005. 420 с.
6. NXSCAN. Manual. IRIS, 1992.
7. Anderson, J. Center for seismic studies. Version 3 Database: Schema reference manual./ J. Anderson, W.E. Farell [et al.] // Technical Report C90-01, Arlington. - 1990.
8. William, C. Seismic analysis cod / C. William, Tapley and Joseph E. Tull // LLNL. - Livermore - 1993.



**АЙЫРЫП ТАНУДЫҢ ЖАҢА ТӘСІЛДЕРІН ДАМЫТУ ҮШІН  
ЖЕРАСТЫ ЯДРОЛЫҚ ЖАРЫЛЫСТАРДЫҢ ТАРИХИ СЕЙСМОГРАММАЛАРЫ**

**Узбеков А.Н., Соколова И.Н.**

*ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

Ядролық жарылыстардың жазбалары бар тарихи аналогты сейсмограммаларын цифрлық түріне көшіру бойынша жұмыстардың нәтижелері келтірілген. Цифрлау технологиясы әзірленген, 1961-1985 ж.ж. кезеңіне ядролық жарылыстардың көздері және тіркеу станциялары туралы деректері жиналған, 2000-нан артық мұрағаттық сейсмограммалары цифрланған.

**THE HISTORICAL SEISMOGRAMMS OF NUCLEAR EXPLOSIONS  
FOR THE DEVELOPE NEW APPROUCHES IN DESCRIMINATION**

**A.N. Uzbekov, I.N. Sokolova**

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

This work presents the results of conversion of historical analog seismograms containing records of nuclear explosions to digital ones. Transfer method was developed, data on sources of nuclear explosions and recording stations were collected. More than 2000 archive records were digitized since 1961 till 1985.

УДК 539.17; 539.143/144

**НЕСФЕРИЧНОСТЬ АТОМНЫХ ЯДЕР, ИЗМЕРЕННАЯ  
МЕТОДОМ ФРЕНЕЛЕВСКОЙ ДИФРАКЦИИ ИОНОВ**

Дьячков В.В., Юшков А.В., Алексеенко Г.Г.

*Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан*

Недавно получено теоретическое обоснование для измерения несферичности указанных ядер методом френелевской дифракции по упругому каналу малоуглового рассеяния. В связи с большими сечениями упругого рассеяния в кулоновски освещенной области такой метод является чрезвычайно привлекательным и прецизионным для постановки экспериментов на пучках экзотических радиоактивных и тяжелых ионов.

В настоящей работе описана методика с позиционночувствительными твердотельно трековыми детекторами (ПТТД), направленная на измерения предсказанных френелевских сдвигов фаз на пучках ускорителей У-150М и ДС-60.

Проанализирована вся мировая база данных по упругому рассеянию экзотических тяжелых ионов, в которых проявляется френелевская дифракция (1-45°). Полученные оптимальные параметры теории однозначно показывают, что френелевские сдвиги фаз существуют, а их знаки соответствуют знакам деформации известных ядер. Угловые распределения упругого рассеяния в диапазоне малых углов становятся чувствительными к «эффектам сплюснутости-вытянутости» ядерной поверхности. Таким образом, метод высших приближений по параметру ядерной несферичности является новым эффективным средством измерения ядерной несферичности. Выполнена экстраполяция значений ядерной деформации в области нейтрондефицитных, нейтроноизбыточных и супертяжелых ядер.

Свойства ядер в основном и в нижних возбужденных коллективных состояниях, лежащих вдоль дорожки стабильности и вблизи нее, хорошо изучены. Наиболее ярким явлением для этой классической области ядер являются оболочечные эффекты геометрических и квантовых характеристик вблизи магических чисел. Однако свойства нейтроноизбыточных и нейтрондефицитных ядер, а также супертяжелых ядер в направлении к «Острову стабильности» практически неизвестны.

Недавно получено теоретическое обоснование для измерения несферичности указанных ядер методом френелевской дифракции по упругому каналу малоуглового рассеяния [1,2]. В связи с большими сечениями упругого рассеяния в кулоновски освещенной области такой метод является чрезвычайно привлекательным и прецизионным для постановки экспериментов на пучках экзотических радиоактивных и тяжелых ионов.

С помощью специального созданного программно-математического обеспечения проанализирована вся мировая база данных по упругому рассеянию экзотических тяжелых ионов, в которых проявляется френелевская дифракция (1-45°). Полученные оптимальные параметры теории однозначно показывают, что френелевские сдвиги фаз существуют, а их знаки соответствуют знакам деформации известных ядер. Таким образом, метод высших приближений по параметру ядерной несферичности является новым эффективным средством измерения как абсолютной величины ядерной несферичности так и ее знака.

В данной работе развит метод с повышенным угловым разрешением измерений френелевской дифракции радиоактивных пучков на ядрах и исполь-

зован для прецизионных измерений размеров ядер, величин и знаков квадрупольной ядерной деформации экзотических ядер. Путем экстраполяции в область нейтронного избытка и в область нейтронного дефицита изучены закономерности убывания периодов полураспада за счет катастрофического развития деформации формы ядер в изотопических цепочках. Путем экстраполяции в область сверхтяжелых ядер изучен феномен «конечности» таблицы Менделеева и его интерпретация за счет катастрофического развития деформации формы тяжелых и сверхтяжелых ядер либо осцилляции формы от сферической до сильно деформированной.

При взаимодействии радиоактивных пучков ускоренных заряженных экзотических частиц с ядрами при больших параметрах Зоммерфельда по полученным дифференциальным сечениям упругого рассеяния в диапазоне малых углов френелевского типа позволяют с помощью современных теоретических моделей извлечь абсолютные значения квадрупольной ядерной деформации и такую уникальную характеристику как знаки деформации экзотических ядер, в том числе, например, долгоживущих изомеров.

Актуальность исследований обусловлена современной тенденцией в фундаментальной ядерной физике - изучение предельных и экзотических свойств в структуре ядер и механизмах ядерных реакций: открытие и изучение природы ядер с аномально большими радиусами (например, у лития-11); ядер с аномальной функциональной зависимостью энергии связи (например, у сверхтяжелых изотопов гелия); открытие необычных кластерных состояний; обнаружение аномально большой квадрупольной ядерной несферичности. Такие предельные свойства

способствуют более глубокому пониманию природы сильных взаимодействий и помогают построению адекватных ядерных моделей. Это, в свою очередь, сулит прорывные научные возможности в практику, прежде всего, в энергетику. Кроме того, последовательное изучение изотопических вариаций формы ядер – один из эффективных путей выявления экзотических свойств и аномалий ядерной материи.

В частности, при высоких энергиях (100 - 200 МэВ), то есть на пороге рождения мезонов и выше малость де-бройлевской длины волны (менее 0,1 Ферми) налетающих частиц позволяет зондировать тонкие детали структуры ядер. Это позволяет оценить вероятности виртуальных кластерных внутриядерных образований как в равновесном, так и в возбужденных состояниях ядра. И, наконец, исследования взаимодействий частиц высоких энергий со сверхтяжелыми ядрами позволяют выявить возможность существования странной кварковой материи, когда нуклонная структура ядра «расплавляется» в гомогенную субстанцию из кварков и глюонов.

Дифракционный подход в физике ядерных реакций привел в последние годы к большим успехам в понимании процессов ядерных реакций упругого и неупругого рассеяния, а через это понимание механизма реакции – к большим успехам в изучении тонких черт структуры атомных ядер. Однако френелевское дифракционное рассеяние различных частиц на ядрах химических элементов изучено мало. При средних энергиях до 10 МэВ/нуклон дифракционные осцилляции фраунгоферовского типа в диапазоне углов  $\theta > \theta_0$ , где  $\theta_0$  – кулоновский угол (угол под который рассеивается частица, имеющая касательную к поверхности ядра траекторию) подавлены сильным кулоновским взаимодействием (область «тени»), а в кулоновски «освещенной» области  $\theta < \theta_0$  возникают дифракционные осцилляции другого – френелевского типа. Именно этот тип дифракции еще неизвестен и слабо изучен. Но именно он является единственным источником информации о ра-

диусе взаимодействия, глубине поверхностной переходной зоны и деформации при рассеянии экзотических частиц на различных ядрах.

К настоящему времени имеется обширный материал опубликованных экспериментальных данных по функциям возбуждения различных ядерных реакций в диапазоне энергий до 100 МэВ. Лишь отрывочные данные имеются для диапазона более высоких энергий (в связи с отсутствием соответствующих ускорителей частиц). Однако этот материал не является достаточно полным также вследствие ограниченности возможностей экспериментального исследования: невозможностью измерений сечений некоторых типов ядерных реакций, из тех, что реально реализуются в ядерных процессах; невозможностью приготовления образца-мишени с необходимым изотопическим содержанием исследуемого ядра; невозможностью реализации в эксперименте целого ряда других физических и технических условий. Практически полностью отсутствуют экспериментальные данные по угловым распределениям в области малых углов, то есть в области френелевской дифракции.

В связи с этим возникает необходимость систематизации имеющихся доступных опубликованных экспериментальных данных по сечениям ядерных реакций в зависимости от типа реакции, ядра-мишени, на котором происходит данный вид реакции, и другими физическими условиями. Цель такой систематизации – получение общих закономерностей в сечениях ядерных реакций, глобализации феноменологических и теоретических параметров моделей с последующим восполнением, указанных выше, пробелов в банках экспериментально измеренных сечений.

Для анализа френелевских сдвигов фаз использованы выполненные нами ранее измерения дифференциальных сечений упругого рассеяния  $\alpha$ -частиц на тяжелых ядрах  $^{206,207,208}\text{Pb}$  в диапазоне  $4-60^\circ$  при энергии 40 МэВ [3].

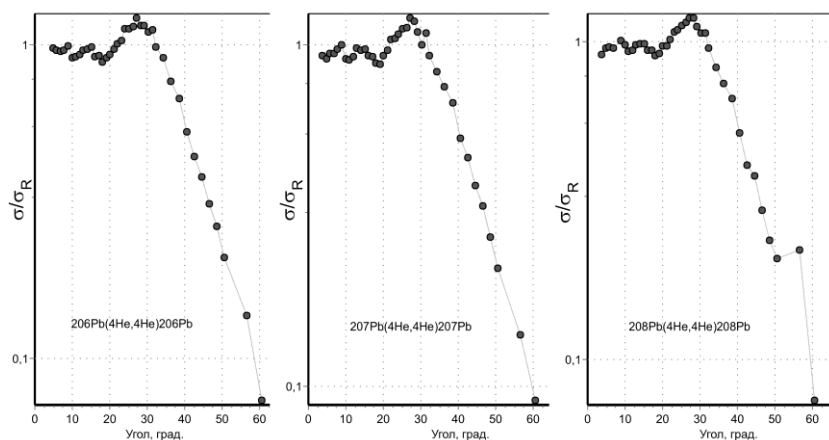


Рисунок 1. Экспериментальные данные дифференциальных сечений упругого рассеяния  $\alpha$ -частиц на тяжелых ядрах  $^{206,207,208}\text{Pb}$  при энергии 40 МэВ

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ШЕБЕКО-КОТЛЯРА  
ДЛЯ АНАЛИЗА КВАДРУПОЛЬНОЙ ЯДЕРНОЙ  
ДЕФОРМАЦИИ**

Разработано программное обеспечение для расчетов угловых распределений дифференциальных сечений упругого рассеяния  $\alpha$ -частиц и тяжелых ионов на тяжелых ядрах при больших параметрах Зоммерфельда по математической модели теоретическое обоснование которой было сделано А.В. Шебеко и В.В. Котляром. Модель Шебеко-Котляра дает возможность в амплитуде рассеяния достаточно просто выделить множители, зависящие от абсолютной величины и знака параметра квадрупольной ядерной деформации. Тогда окончательное выражение для амплитуды рассеяния принимает вид

$$f(\theta) = \left[ G(\theta) + \text{sign}(\beta_2) \cdot \frac{\exp(-ix - i\pi/4)}{2\sqrt{\pi x}} \right] \times (1) \\ \times f_R(\theta) + \tilde{f}^{(+)}(\theta) + \tilde{f}^{(-)}(\theta)$$

где

$$\tilde{f}^{(\pm)}(\theta) = \frac{1}{k} \cdot \left[ \frac{L}{2\pi \cdot \sin \theta} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \exp(2i\sigma l_0) \times \\ \times \frac{\Phi(-i\lambda \theta_0 \pm \theta, 1; 2i\delta_0)}{sh \pi \lambda \theta_0 \pm \theta} \cdot \exp\left(\pm i l_0 \mp i \frac{\pi}{4}\right) \times$$

$$\times \frac{\exp(1/3iy_{\pm})}{\sqrt{iy_{\pm}}} \cdot \text{Erf} \sqrt{iy_{\pm}}$$

$$y_{\pm} = -\frac{3}{4} \sqrt{\frac{5}{\pi}} \cdot \frac{R_0}{R_{int}} \cdot \beta_2 \cdot L \cdot \theta_0 \pm \theta,$$

$$f_R(\theta) = \frac{1}{2ik} \cdot \frac{n}{\exp(-2in)} \cdot n^{2in} \cdot \left[ \sin \frac{\theta}{2} \right]^{-2-2in},$$

$$G(\theta) = \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 + \frac{2}{\sqrt{2}} \cdot \text{sign}(\beta_2) \cdot \theta \cdot \text{Erf} \sqrt{ix} \right],$$

$$x = n \cdot \left[ \theta - \theta_0 \cdot \text{ctg} \frac{\theta_0}{2} + 2 \cdot \ln \frac{\sin \theta_0 / 2}{\sin \theta / 2} \right],$$

где  $\text{Erf } z$  – интеграл вероятности;  $\Phi(a, b; c)$  – вырожденная гипергеометрическая функция. В силу трудности и отсутствия методов практических расчетов интеграла вероятности от комплексного аргумента была выполнена замена через интегралы Френеля.

$$\text{Erf} \sqrt{ix} = \sqrt{2i} \cdot [C(x) - S(x)],$$

где  $C(x)$ ,  $S(x)$  – интегралы Френеля.

Выполненные расчеты представлены на рисунке 2, из которого видно сколь сильное влияние на результат теоретических расчетов оказывает знак параметра квадрупольной деформации.  $\text{sign } \beta_2$ .

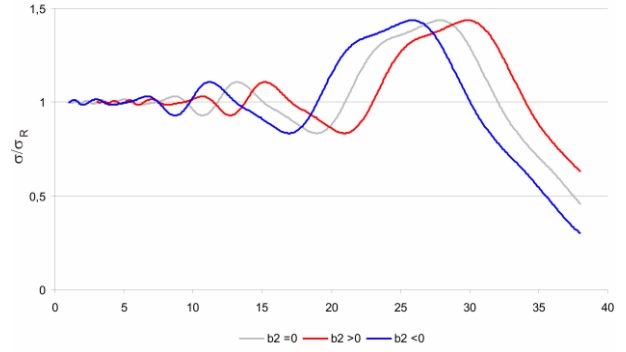


Рисунок 2. Эффе́кт влияния сдвига френелевских фаз на функциональную зависимость от угла отношения сечений двух ядер (деформированного и сферического)

Поиски этого эффекта в эксперименте предприняты в настоящей работе на примере рассеяния  $\alpha$ -частиц на  $^{206}\text{Pb}$  и  $^{207}\text{Pb}$  по отношению к дважды магическому сферическому ядру  $^{208}\text{Pb}$ . В результате выполненных расчетов значения квадрупольной деформации для ядер  $^{206}\text{Pb}$  и  $^{207}\text{Pb}$  относительно  $^{208}\text{Pb}$  представлены в таблице 1. Для более точных значений квадрупольной деформации необходимы прецизионные измерения дифференциальных сечений угловых распределений.

Таблица 1. Значения квадрупольной деформации для ядер  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}$

Ядро	$\beta_2$	$\beta_2$ [4]
$^{206}\text{Pb}$	+0,03	+0,037
$^{207}\text{Pb}$	+0,02	-
$^{208}\text{Pb}$	0	-

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРИЗОВАННОГО  
ФАЗОВОГО АНАЛИЗА**

Разложение амплитуды упругого рассеяния по парциальным волнам имеет вид

$$A(\theta) = \frac{1}{2ik} \cdot \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) e^{2i\eta_l} - 1 P_l \cos \theta$$

где фаза  $\eta_l$  в случае рассеянных заряженных частиц имеет два компонента – кулоновскую фазу  $\sigma_l$  и ядерную фазу  $\delta_l$ ,  $\eta_l = \sigma_l + \delta_l$ . Тогда матрица рассеяния имеет вид

$$S_l = e^{2i\eta_l} = e^{2i(\sigma_l + \delta_l)} = B_l \cdot e^{2i\sigma_l}, \quad B_l = e^{2i\delta_l}$$

В результате получим

$$A(\theta) = \frac{1}{2ik} \cdot \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) e^{2i\eta_l} - 1 P_l \cos \theta = \\ = \frac{1}{2ik} \cdot \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) B_l \cdot e^{2i\sigma_l} - 1 P_l \cos \theta = \\ = \frac{1}{2ik} \cdot \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) e^{2i\sigma_l} B_l - 1 P_l \cos \theta$$

В [5] для сильнопоглощающего ядра матрица рассеяния  $B_l$  представляется в следующем практически приемлемом виде

$$B_l = u + iv; u = \frac{1}{1 + e^{\frac{l-l_1}{\lambda_1}}};$$

$$v = \frac{b}{ch^2\left(\frac{l-l_2}{\lambda_2}\right)}; B_l = \frac{1}{1 + e^{\frac{l-l_1}{\lambda_1}}} + i \frac{b}{ch^2\left(\frac{l-l_2}{\lambda_2}\right)}$$

Оптимальные параметры для данной матрицы рассеяния взяты из [4].

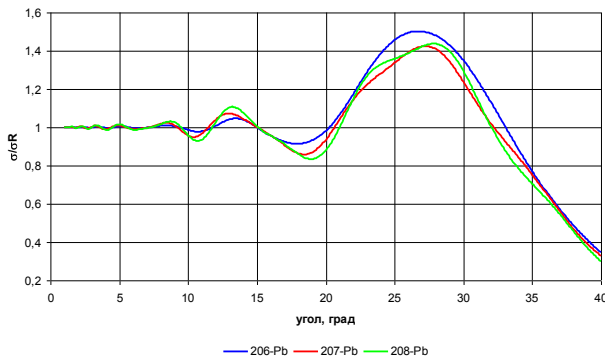


Рисунок 3. Дифференциальные сечения рассчитаны с помощью параметризованного фазового анализа

На рисунке 3 представлен расчет дифференциальных сечений угловых распределений методом параметризованного фазового анализа, из которого видно, что сдвиги фаз для изотопов свинца имеют один и тот же знак (сдвинуты в одну и ту же сторону). Таким образом, метод ПФА подтверждает правильность выполненных расчетов дифференциальных сечений по модели Шебеко-Котляра.

**ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ ЗНАЧЕНИЙ ЯДЕРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ОБЛАСТИ НЕЙТРОНОДЕФИЦИТНЫХ, НЕЙТРОНОИЗБЫТОЧНЫХ И СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР**

Несферичность атомных ядер является определяющей особенностью внутриядерного движения нуклонов и их ассоциаций (кластеров). Свойства ядер в основном и в нижних возбужденных коллективных состояниях, лежащих вдоль дорожки стабильности и вблизи нее, хорошо изучены. Однако продвижение в изучении структуры нейтронодефицитных и нейтроноизбыточных ядер стало возможным лишь в последнее время в связи с развитием техники радиоактивных пучков. Представляют большой интерес попытки предсказания несферичности таких экзотических ядер на основе систематики уже известных параметров [4]. На рисунке показана аппроксимация с помощью полиномов 2-6 степени несферичности указанных ядер.

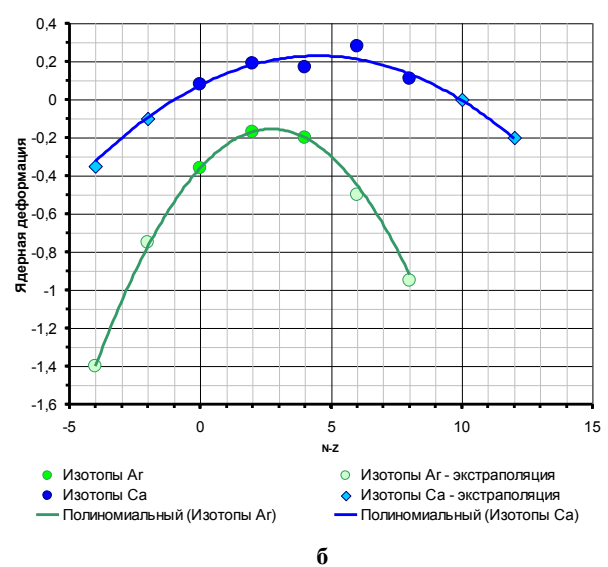
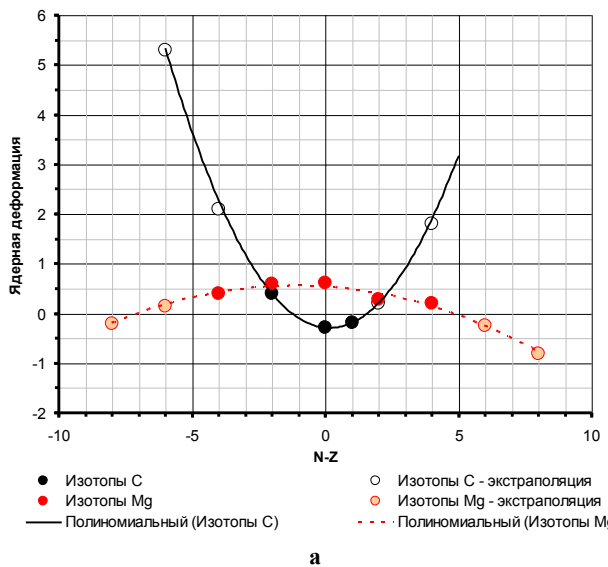


Рисунок 4. Экстраполяция систематизированных экспериментальных данных по ядерной несферичности в сторону экзотических нейтронодефицитных и нейтроноизбыточных ядер для изотопов углерода и магния а) и изотопов аргона и кальция б)

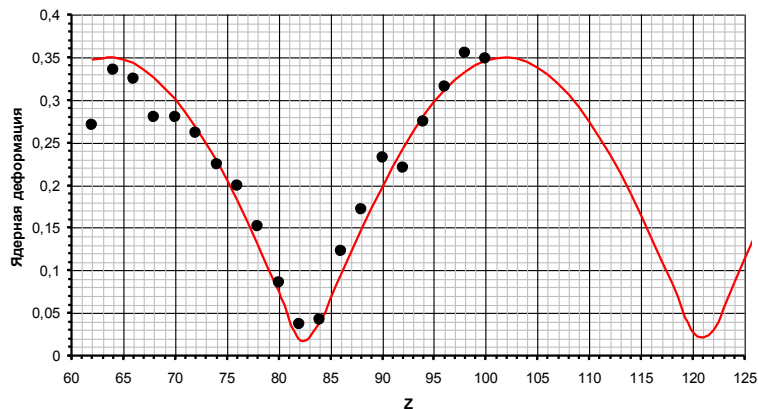
Из рисунка 4 видно anomальное развитие несферичности до величин больших единицы, что нехарактерно для классической области вдоль дорожки стабильности. Такое развитие деформации экзотических ядер наводит на мысль о том, что экспоненциальное уменьшение периодов полураспада в сторону  $|N - Z| \gg 1$  [6] связано именно с развитием дефор-

мации. Например, для экзотического ядра  ${}^6_0\text{C}$  (!) такая деформация возможна лишь при выстраивании всех нуклонов в одну линию, что и приводит к их немедленному распаду. Экспериментальной проверкой такого характера изменения деформации ядер может послужить френелевское рассеяние ядер на

ядрах в области малых углов с использованием радиоактивных пучков.

Путем систематизации новых данных по несферичности ядер и уже имеющихся в распоряжении авторов [4] на рисунке 5 получена закономерность

изменения квадрупольной ядерной деформации и экстраполирована в область тяжелых и сверхтяжелых ядер, которая предсказывает начало «Острова стабильности» при  $Z=121$ .



Точки — [4]; красная линия — экстраполяция в область тяжелых и сверхтяжелых ядер

Рисунок 5. Ядерная деформация для четно-четных ядер

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Котляр, В.В. О дифракционных явлениях в упругом рассеянии тяжелых ионов / В.В.Котляр, А.В. Шебеко // Ядерная физика. —1981. — Т. 34, вып.2(8). —С. 370-385.
2. Котляр, В.В. Эффекты высших приближений по параметрам ядерной деформации в упругом рассеянии тяжелых ионов / В.В.Котляр, А.В. Шебеко // Ядерная физика. —1982. -Т. 35, вып. 4. — С. 912-916.
3. Гончар, В.Ю. Рассеяние альфа-частиц на изотопах свинца / В.Ю.Гончар, К.С. Желтоног, Г.Н. Иванов, А.В. Юшков // Ядерная физика. —1969. — Т. 9, вып. 4. — С. 702-709.
4. Юшков, А.В. Поверхность  $\beta(Z,N)$  ядерной деформации для ядер с  $Z=2\div 102$ . / А.В. Юшков. ЭЧАЯ, 1993 - Т. 24, вып. 2. — С. 348-408.
5. Гончар, В.Ю. Исследование однозначности параметров в методе фазовых сдвигов. / В.Ю. Гончар // Ядерная физика. — 1969. — Т.9, вып.5. —С. 987-996.
6. Иванов, А.М. Изотопический закон изменения периодов полураспада атомных ядер / А.М. Иванов, Юшков А.В. // Изв. АН КазССР. —1979. Сер. физ.-матем. —№4. —С. 39-41.

### ИОНДАРДЫҢ ФРЕНЕЛЬ ДИФРАКЦИЯСЫ ӘДІСІМЕН ӨЛШЕНЕТІН АТОМ ЯДРОЛАРЫ ФОРМАЛАРЫНЫҢ СФЕРАДАН АУЫТҚУЫ

Дьячков В.В., Юшков А.В., Алексеенко Г.Г.

*ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан*

Жақында ядро формаларының сферадан ауытқуының кіші бұрышты шашырау каналы бойынша Френель дифракциясы әдісімен өлшеу мүмкіндігі туралы теориялық негіз алынды. Кулон өрісі аймағында шашыраудың кимасы үлкен болғандықтан, бұл әдіс экзотикалық радиоактивті және ауыр иондар шоғында тәжірибелер жүргізуге өте тартымды болып табылады.

Бұл жұмыста сезгіш қатты денелі тректік детекторлар методы жазылған және ол У-150М және ДС-60 үдеткіштер шоғында белгілі френельдік фазалар ығысуын өлшеуге бағытталған.

Бүкіл әлемнің экзотикалық ауыр ядролардың серпімді шашырауы бойынша деректер базасы, яғни Френель дифракциясы байқалатын жағы ( $1-45^\circ$ ) талданды. Теориядан алынған оптимал параметрлер френельдік фазалар ығысуының бар екенін көрсетеді, ал олардың таңбалары белгілі ядролардың деформациясы таңбаларына сәйкес келеді. Кіші бұрыштар аралығында серпімді шашыраудың бұрыштық таралуы ядро бетінің «сығылғандық-созылғандық эффектісіне» сезімтал болып келеді. Осылай, ядро формасының сферадан ауытқуы параметрлері бойынша жоғарғы жуықтаулар әдісі жаңа эффективті әдіс болып табылады. Ядролық деформация мәндері аз нейтронды, көп нейтронды және өте ауыр ядролар аймағына экстраполяция жасалды.

**NONSPHERICALNESS OF NUCLEI, MEASURED WITH FRESNEL DIFFRACTION METHOD BY IONS**

**V.V. D'yachkov, A.V. Yushkov, G.G. Alekseenko**

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

Recently, obtained theoretical justification for measuring nonsphericalness of indicated nuclei with Fresnel diffraction by elastic small angle scattering canal. Because of elastic cross sections in Coulomb lighting region is large; this method is extremely interesting and sensitive for experiments with exotic and heavy ion beams.

At present work shown the method based on position-sensitive solid tracking detectors (PSTD), pointed to measuring predicted Fresnel phase shifts on U-150M and DC-60 accelerator beams.

Analyzed all the world's database of elastic scattering exotic heavy nuclei, in which appears Fresnel diffraction (1-45°). The obtained theoretical optimality parameter unambiguously shows, that Fresnel phase shifts exists, and their signs correspond to deformation signs of known nuclei. Angular distribution for elastic scattering at the small angles range comes sensitive to "flatness and oblongness effects" of nuclear surface. So, highly approaching method by nuclear deformation parameters is new effective remedy for measuring nonsphericalness of nuclei. Executed extrapolation of nuclear deformation signs in the region of neutron-deficient, neutron-excess and super-heavy nuclei.

УДК 539.21;541.135

**АНТИКОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА НИТРИДОВ, АЛЮМИНИДОВ, БЕРИЛЛИДОВ ТИТАНА И КОМБИНИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ**

Поляков А.Н., Поддубная Е.В., Антонюк В.И., Иманбеков Ж.Ж.

*Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан*

Методами рентгеновской дифракции, электрохимической коррозии и термического испытания на стойкость в атмосфере кислорода и водорода исследовались различные пленки на основе нитридов, алюминидов и бериллидов титана, а также комбинированные покрытия на металлах. В качестве подложек для покрытий использовались образцы-подложки, изготовленные из чистого железа  $\alpha$  – Fe, нержавеющей стали 12X18H10T, суперсплава ЧС-42 и чистого Ti, на которые наносились различные антикоррозионные и износостойкие покрытия, которые затем проходили испытания на коррозионную стойкость.

Показано, что наиболее эффективной обработкой поверхности подложек из железа  $\alpha$  – Fe, суперсплава ЧС-42 является нанесение покрытия из порошка ПГ-19-01Н методом импульсно-плазменного напыления.

Выявлено, что хорошие антикоррозионные свойства имеют комбинированные пленки на основе (Ti-Al)N. Установлено, что наиболее эффективным антикоррозионным покрытием является пленка нитрида алюминия (AlN), полученная при ионно-плазменном напылении.

Термодиффузионное образование тонкослойных бериллидов титана на обеих сторонах титанового образца защищает титан от наводороживания при условиях испытания:  $T = 500^\circ\text{C}$ , 4 ч, давление  $\text{H}_2$  300 торр.

**ВВЕДЕНИЕ**

Создание многофункциональных систем с изменяющимися по глубине свойствами – от коррозионно- и жаростойких приповерхностных слоев до механически и термически прочного основного материала – одна из перспективных задач современного металлостроения. В последние годы стали широко использовать процессы химико-термической обработки (ХТО) для улучшения свойств поверхностных слоев различных металлов и сплавов, особенно таких, как титан, молибден, вольфрам и ниобий.

Диффузионное насыщение материалов различными элементами предназначено для повышения эксплуатационных свойств, таких как твердость, износостойкость и сопротивление коррозии, и др.

ХТО вышеперечисленных металлов проводится при высоких температурах и длительных выдержках, что часто приводит к ухудшению свойств сердцевины изделий и короблению.

Использование прогрессивных технологий, таких, как ионно-плазменное напыление, импульсно-плазменная обработка поверхности, детонационное нанесение упрочняющих покрытий, позволяет получать качественно новые структуры и фазы, устранить ряд затруднений и создать высокоэффективные технологические процессы [1, 2].

Целью работы является получение и исследование новых защитных покрытий на основе нитридов, алюминидов, бериллидов титана и комбинированных покрытий, обладающих повышенными антикоррозионными свойствами при различных режимах испытаний.

**ЭКСПЕРИМЕНТ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ****Объекты и методы исследования**

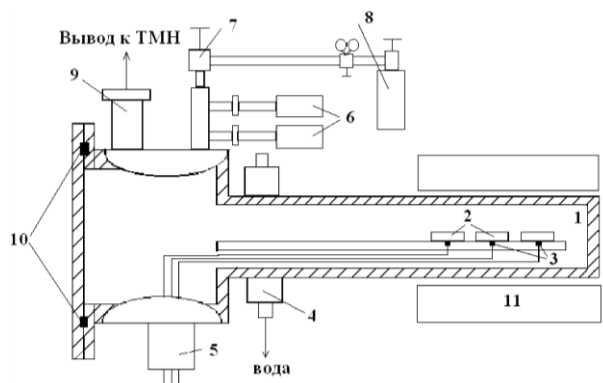
Методами рентгеновской дифракции, электрохимической коррозии и термического испытания на стойкость в атмосфере кислорода и водорода исследовались различные пленки на основе нитридов, алюминидов и бериллидов титана, а также комбинированные покрытия на металлах. В качестве подложек для покрытий использовались образцы-подложки, изготовленные из чистого  $\alpha$  – Fe, нерж. ст. 12X18H10T, суперсплава ЧС-42 и чистого Ti.

Износостойкие покрытия на основе порошка ПГ-19-01Н наносились детонационным и импульсно-плазменным методами на установке «Импульс-6» (Институт модификации поверхности, Сумы, Украина), а антикоррозионные покрытия получены ионно-плазменным методом на установке «Аргмак» (Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан) [1, 3].

Для исследования влияния термических воздействий на приготовленные различными технологиями образцы была разработана и изготовлена высокотемпературная вакуумная камера из нержавеющей стали, которая позволяет проводить отжиги образцов при температурах до  $1200^\circ\text{C}$  в вакууме не более  $4 \cdot 10^{-6}$  торр или в любой газовой среде (рисунок 1).

Контроль фазово-структурного состояния образца с покрытием и без него проводился на дифрактометре D8 ADVANCE (Bruker) [4]. Для выявления различий в фазовом составе на поверхности и в объеме образца использовался режим дифрактометрической съемки, как с малоугловым, так и с расходящимся падением рентгеновского пучка [5-8].





1- рабочий объем; 2- ниобиевые лодочки; 3- термопары хромель-алюмель; 4- водяная рубашка; 5- гермоввод многостырьковый; 6- датчики вакуума; 7- нагреватель; 8- газовый баллон; 9- вакуумная откачка ТМН; 10- уплотнитель; 11-нагревательный элемент

Рисунок 1. Конструкционная схема высокотемпературной вакуумной камеры

Для исследования коррозионных свойств материалов использовалась фундаментальная электрохимическая система (Gamry Instruments), включающая: PCI 4/300 – потенциостат/гальваностат ZRA, электрохимическое программное обеспечение DC 105, коррозионную ячейку.

#### Термические испытания на воздухе

При исследованиях образцов-подложек найдено, что окисление образца железа  $\alpha$  – Fe в атмосфере кислорода происходит уже при  $T = 500^\circ\text{C}$ , полное окисление наблюдается при  $T=900^\circ\text{C}$ . А окисление образца сплава ЧС-42 начинается при  $T = 700^\circ\text{C}$ , является новая фаза магнетит  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

Проведен отжиг на воздухе при  $700^\circ\text{C}$  образцов после плазменной обработки и нанесения порошка ПГ-19-01Н методами детонационного и импульсно-плазменного напыления. Рентгенофазовый анализ показал, что в результате отжига в образцах произошли необратимые фазовые изменения.

Основными фазами образца железа  $\alpha$  – Fe после нанесения порошкового покрытия *методом детонационного напыления* являются две фазы:  $\text{Ni}_3\text{B}$  с параметрами ромбической сингонии и твердый раствор на основе Ni. В образце имела большая доля рентгеноаморфной фазы, представленная диффузным максимумом в большом интервале углов, которая может быть отнесена к неокристаллизовавшемуся бориду никеля.

Основной фазой образца после отжига на воздухе при  $700^\circ\text{C}$  является твердый раствор на основе никеля. Борид никеля -  $\text{Ni}_3\text{B}$  и рентгеноаморфная фаза отсутствуют. В очень малом количестве имеется магнетит  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , который представлен двумя очень слабыми линиями.

Сравнение рентгенограмм образца  $\alpha$ -Fe с детонационным напылением порошка ПГ- 19-01Н до и после отжига при  $700^\circ\text{C}$  показано на рисунке 2.

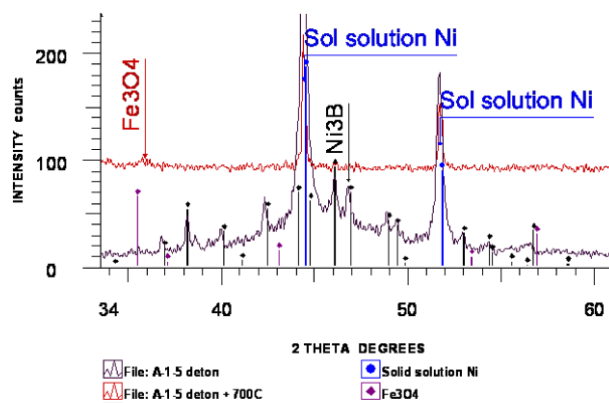


Рисунок 2. Сравнение рентгенограмм образца  $\alpha$ -Fe с детонационным напылением порошка ПГ- 19-01Н до и после отжига при  $700^\circ\text{C}$

Основными фазами образца железа  $\alpha$  – Fe после нанесения порошкового покрытия ПГ- 19-01Н *методом импульсно-плазменного напыления* являются две фазы, одна из которых является  $\text{Ni}_3\text{B}$  с параметрами ромбической сингонии. Вторая фаза является твердым раствором на основе Ni. В образце имеется большая доля рентгеноаморфной фазы, представленная диффузной линией в большом интервале углов.

После отжига на воздухе при  $700^\circ\text{C}$  в этом образце основной фазой является твердый раствор на основе никеля. Борид никеля  $\text{Ni}_3\text{B}$  присутствует в меньшем количестве, чем до отжига. Отметим, что до отжига  $\text{Ni}_3\text{B}$  определялся по 12 линиям, после отжига он определяется по 6 линиям. Рентгеноаморфная фаза отсутствует.

Выполнены рентгеноструктурные исследования образцов из сплава ЧС-42 с покрытием:  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN} + (\text{Ti-Al})\text{N}$  после нанесения слоев *магнетронным методом* (исходные) и после отжигов на воздухе в течение 3 часов при  $T = 500; 700; 900^\circ\text{C}$ .

В образце стали ЧС-42 с комбинированным покрытием  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN} + (\text{Ti-Al})\text{N}$  в исходном состоянии обнаружено присутствие трех фаз:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , TiN и  $\text{AlTi}_3\text{N}$  (рисунок 3).

После отжига при  $T= 500^\circ\text{C}$ , 3ч на воздухе образец не претерпевает фазовых и структурных изменений. При  $T= 700^\circ\text{C}$ , 3ч на воздухе в образце наблюдается появление новой фазы - рутила  $\text{TiO}_2$ .

После отжига образца при  $T= 900^\circ\text{C}$ , 3ч на воздухе дифракционные отражения нитридов титана – TiN и  $\text{AlTi}_3\text{N}$  отсутствуют. Заметна перекристаллизация фазы  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , что проявляется расщеплением рефлекса 202. Структура подложки сплава ЧС-42 не наблюдается (рисунок 4).

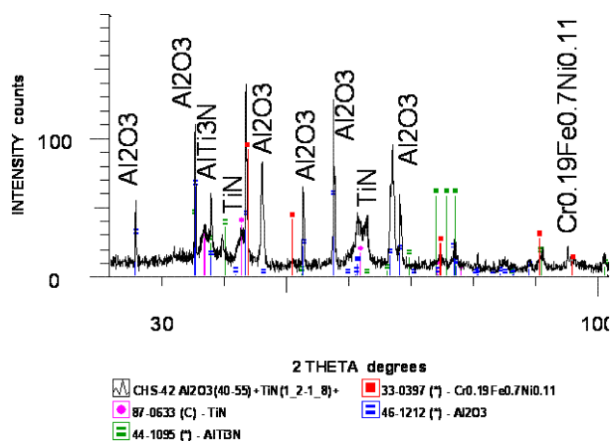


Рисунок 3. Дифрактограмма исходного образца с напылением состава  $Al_2O_3+TiN+(TiAl)N$  на подложке из сплава ЧС-42

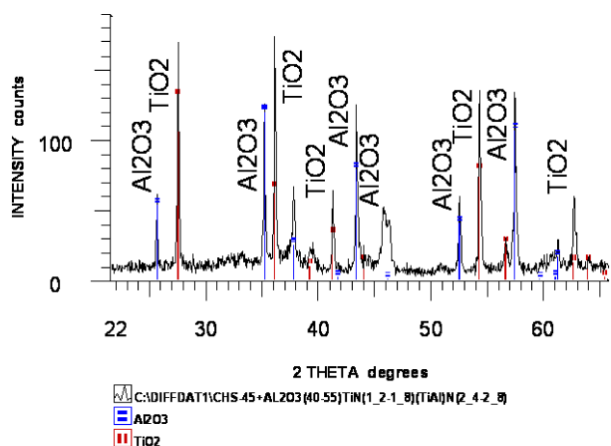


Рисунок 4. Участок дифрактограммы образца сплава ЧС-42 с покрытием  $Al_2O_3+TiN+(TiAl)N$  после отжига 900°C 3ч на воздухе

Термические испытания на воздухе показали, что покрытия на основе порошка ПГ-19-01Н незначительно улучшают жаростойкость подложек из чистого  $\alpha$ -Fe, однако наблюдается различие свойств нанесенных покрытий от метода нанесения. Более стойкими к термическим испытаниям на воздухе оказались порошковые покрытия на основе ПГ-19-01Н, полученные импульсно-плазменным методом напыления.

### Коррозионные испытания

Коррозионные испытания образцов с покрытиями различного состава проводились в 2% водном растворе NaCl при  $T = 18^\circ C$ . Для снятия поляризационных кривых использовался каломелевый электрод сравнения.

Таблица 1. Ток, потенциал и скорость коррозии образцов 12X18H10T с покрытиями Ti-Al-N после облучения протонами

№ образца и вид покрытия	№1 TiN	№2 Ti80Al20N	№3 Ti60Al40N	№4 AlN
$I_{corr}(\mu A)$	0,073	0,02	0,046	0,007
$E_{corr}(mV)$	- 166,0	- 137	- 211	- 150
$V_{corr}(\mu py)$	0,317	0,09	0,213	0,036

Выполнены коррозионные исследования образцов с покрытиями Ti-Al-N с различным соотношением Ti и Al на нерж. ст. 12X18H10T, образцов из чистого Ti, нержавеющей стали и Al.

Исследования показали, что скорость коррозии образцов с покрытиями максимальна при максимальной концентрации Ti в пленке (TiN) и минимальна при максимальной концентрации алюминия в пленке (AlN). Зависимость скорости коррозии от состава покрытия образцов показана на рисунке 5.

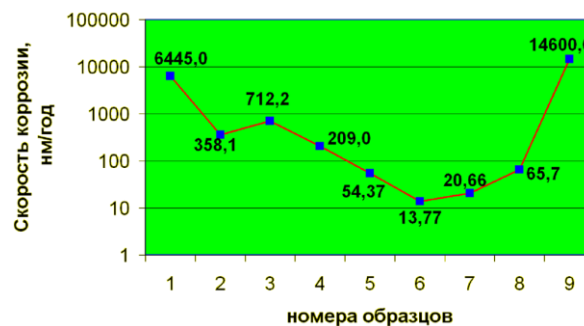


Рисунок 5. Зависимость скорости коррозии от состава покрытия образцов

Аморфизированная пленка AlN на поверхности нерж. ст. уменьшает скорость коррозии нержавеющей стали в пять раз. Это следовало ожидать, поскольку у AlN покрытий согласно литературе, хорошие антикоррозионные свойства [9]. Коррозионные данные по чистому Ti подобны пленке из AlN. Чистый Al имеет наибольшую скорость коррозии.

Были проведены коррозионные исследования четырех образцов нерж. ст. 12X18H10T с покрытиями Ti-Al-N с различным соотношением Ti и Al после облучения протонами с энергией 0,5 МэВ на линейном ускорителе УКП-2-1 (ИЯФ НЯЦ РК) [1] (таблица 1).

Наименьшая скорость коррозии определена для образца с покрытием AlN (№ 4). Как было показано нами ранее у нитрида алюминия очень хорошие антикоррозионные свойства. На образце с покрытием из нитрида алюминия после облучения протонами скорость коррозии увеличилась в 3 раза. Видимо, после облучения протонами коррозионные свойства покрытия несколько ухудшились, хотя и остались наилучшими среди данной партии образцов.

Были проведены коррозионные исследования образцов сплава ЧС-42 с покрытиями следующего состава: TiN; (Ti50Al50)N; AlN после нанесения слоев магнетронным методом (таблица 2).

**АНТИКОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА НИТРИДОВ, АЛЮМИНИДОВ, БЕРИЛЛИДОВ ТИТАНА  
И КОМБИНИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ**

Таблица 2. Ток, потенциал и скорость коррозии образцов стали ЧС-42 с покрытиями

№ образца и вид покрытия	№1 TiN	№2 Ti <sub>0,5</sub> Al <sub>0,5</sub> N	№3 AlN	№4 ЧС-42
$I_{corr}(\mu A)$	0,323	0,044	0,005	2,15
$E_{corr}(mV)$	-463,0	-240,0	-183,0	-299
$V_{corr}(\mu py)$	1,407	0,209	0,027	3,423

Таблица 3. Ток, потенциал и скорость коррозии стали ЧС-42 с комбинированными антикоррозионными покрытиями

№ образца и вид покрытия	№ 1 WC86Co10Cr4 + Ti25N25Si50	№ 2 WC86Co10Cr4 + Ti25N25Si50	№ 3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiN + (Ti-Al)N	№ 4 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiN + (Ti-Al)N
$I_{corr}(\mu A)$	18,20	20,90	0,221	0,420
$E_{corr}(mV)$	-525,0	-458,0	-276,0	-180,0
$V_{corr}(\mu py)$	93,69	107,4	1,779	3,377

Наименьшая скорость коррозии определена для образца с покрытием из нитрида алюминия (№ 3). Ранее было уже показано, что у нитрида алюминия очень хорошие антикоррозионные свойства и пока самые лучшие среди испытанных покрытий.

Покрытие из нитрида титана улучшает антикоррозионные свойства защищаемой поверхности ЧС-42 в 2,5 раза, а покрытие Ti<sub>0,5</sub>Al<sub>0,5</sub>N – более чем в 15 раз.

Были проведены коррозионные исследования образцов стали ЧС-42 с комбинированными покрытиями следующего состава: WC86Co10Cr4 + Ti25N25Si50; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + TiN + (Ti-Al)N (таблица 3).

Наименьшей скорости коррозии подвержены образцы № 3 и № 4 с комбинированным покрытием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + TiN + (Ti-Al)N, что практически соответствует антикоррозионным свойствам защищаемой поверхности сплава ЧС-42.

Комбинированное покрытие WC86Co10Cr4 + Ti25N25Si50 (образцы № 1 и № 2) значительно (~ в 30 раз) ухудшает антикоррозионные свойства защищаемой поверхности сплава ЧС-42.

**Термические испытания в водороде**

Исследования защитных свойств бериллидов титана проводились на образцах титановой фольги толщиной 50 мкм с двухсторонним напылением слоя Ве толщиной 1,3 и 2 мкм (получено на магнетронной установке).

Для образования бериллидов титана были проведены изотермические отжиги при T = 500°C и давлении не более 4·10<sup>-6</sup> торр. Образование бериллидов титана при изотермическом отжиге показано на рисунке 6 (а, б).

После 20 часов отжига процесс фазообразования стабилизируется и дальнейший отжиг не влияет на содержание бериллидов.

Образцы Ti-ой фольги толщиной 50 мкм и двухсторонним слоем бериллидов Ве<sub>2</sub>Ti и ВеTi, (полученные после термодиффузионного синтеза), были испытаны на воздействие водорода в заданном интервале температур и давлений.

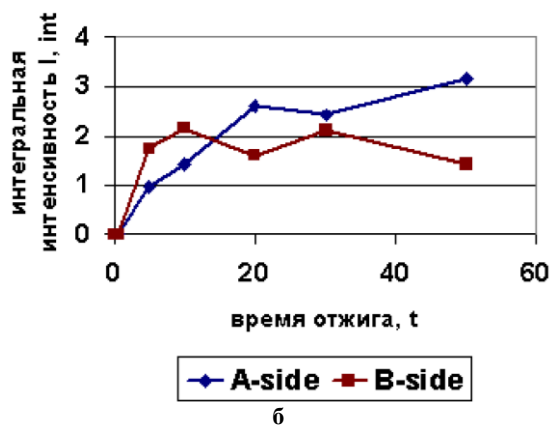
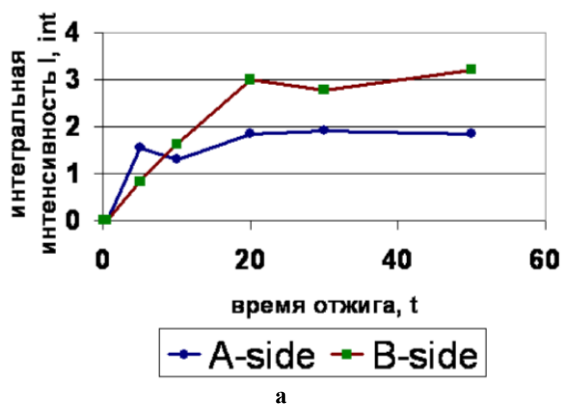


Рисунок 6. Образование бериллидов ВеTi (а) и Ве<sub>2</sub>Ti (б) на двух сторонах титановой фольги при T = 500°C

Гидрирование образцов с покрытиями при температуре 500°C в течение 4 ч, при давлении H<sub>2</sub> 300 торр показала устойчивость титановых подложек с двухсторонними слоями бериллидов титана к воздействию водорода. Фазовый состав образцов и структура Ti при этом не изменились. Контрольный образец титана без покрытия после такой обработки полностью разрушился с образованием гидроксида титана TiH<sub>1,5</sub> (рисунок 7).

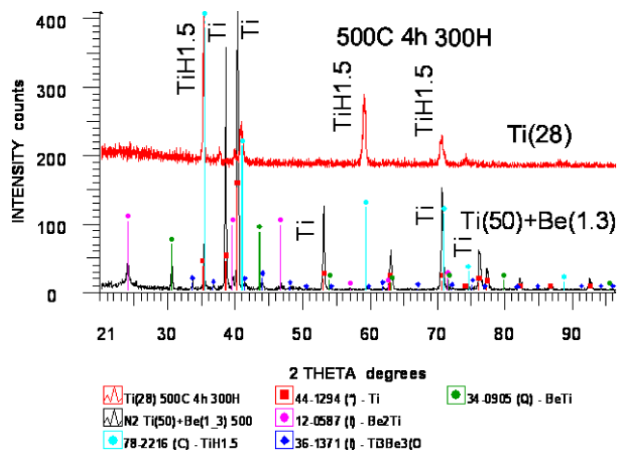


Рисунок 7. Сравнение гидрирования титана без защитного покрытия и образца с двухсторонним слоем бериллидов

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Методами рентгеновской дифракции, электрохимической коррозии и термического испытания на стойкость в атмосфере кислорода и водорода исследованы различные пленки на основе нитридов,

алюминидов и бериллидов титана, а также комбинированные покрытия на металлах.

2. Покрытия на основе порошка ПГ-19-01Н незначительно улучшают жаростойкость подложек из чистого α-Fe, однако наблюдается различие свойств нанесенных покрытий от метода нанесения. Более стойкими к термическим испытаниям на воздухе оказались порошковые покрытия на основе ПГ-19-01Н, полученные импульсно-плазменным методом напыления.

3. Наиболее эффективным антикоррозионным покрытием является нитрид алюминия (AlN) полученный ионно-плазменным методом. Хорошие антикоррозионные свойства имеют комбинированные пленки на основе Ti-Al-N.

4. Протонное облучение с энергией 0,5 МэВ незначительно влияет на антикоррозионные свойства пленок Ti-Al-N.

5. Комбинированное покрытие WC86Co10Cr4 + Ti25N25Si50 значительно (~ в 30 раз) ухудшает антикоррозионные свойства защищаемой поверхности сплава ЧС-42.

6. Впервые обнаружено, что термодиффузионное образование тонкослойных бериллидов титана на обеих сторонах титанового образца защищает Ti от наводороживания при T= 500°C (4 ч, давление H<sub>2</sub> 300 торр).

7. Результаты работы имеют большое практическое значение при разработке технологии получения антикоррозионных покрытий для термоядерной энергетики, устойчивых при высоких температурах в атмосфере кислорода и водорода и при комнатной температуре в среде морской воды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ионно–лучевая и ионно–плазменная модификация материалов / К.К. Кадыржанов [и др.]. – М. : Издательство МГУ, 2005. - 673 с.
2. Модификация свойств материалов и синтез тонких пленок при облучении интенсивными электронными и ионными пучками / А. Н. Валяев [и др.]. - Усть-Каменогорск: ВКТУ, 2000. - С. 345.
3. Ионно-плазменная технология изготовления бериллиевой и бериллийсодержащей фольги / А. Ж. Тулеушев [и др.] // Вестник НЯЦ РК. – 2002. - вып. 4. - С. 26-31.
4. Фазообразование в тонкослойной системе Be-Ti / А. Н. Поляков [и др.] // Вестник НЯЦ РК. – 2008. – вып. 3. – С. 80–83.
5. Высокотемпературная рентгенография тонкослойной системы Be-Ti с различным содержанием бериллия / В. И. Антонюк [и др.] // Радиационная физика твердого тела и проблемы материаловедения: материалы 5-ой международной конференции, 26-29 сентября 2005. – Алматы: ИЯФ НЯЦ РК, 2006 – Т. 2. - С. 201 - 208.
6. LEE, S. C. Prevention of hydrogen degradation in titanium by deposition of TiN thin film / S. C. LEE, W. Y. HO, T. M. CHEN // Journal of materials engineering and performance. - 1994, Vol. 3, №.6. - P. 740-743.
7. Барабаш, О. М. Структура и свойства металлов и сплавов. Кристаллическая структура металлов и сплавов. Справочник / О. М. Барабаш, Ю. Н. Коваль. – Киев: Наукова Думка, 1986.- С. 290-292.
8. Ливанов, В. А. Водород в титане / В. А. Ливанов, А. А. Буханова, Б. А. Колачев. - М. : Metallurgizdat, 1962. - 246 с.
9. Самсонов, Г. В. Неметаллические нитриды / Г. В. Самсонов. - М., 1969. - С. 134-166.

**МЕТАЛЛ ТӨСЕНІШТЕРДЕГІ ТИТАННЫҢ НИТРИДТЕРІНІҢ, АЛЮМИНИДТЕРІНІҢ,  
БЕРИЛЛИДТЕРІНІҢ ЖӘНЕ ҚҰРАСТЫРҒАН ЖАБЫНДЫЛАРДЫҢ КОРОЗИЯҒА ҚАРСЫ ҚАСИЕТТЕРІ**

Поляков А.Н., Поддубная Е.В., Антонюк В.И., Иманбеков Ж.Ж.

*ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан*

Титанның нитридтері, алюминидтері және бериллидтері негізіндегі әралуан үлпектер, сындай-ақ металдпғы құрастырған жабындылар рентгендік дифракция, электрохимиялық коррозия және өттегі атмосферасында бекемдікке жылулық сынақтар жүргізу әдістерімен зерттелді. Жабындылар үшін төсекіш ретінде, таза  $\alpha$  – Fe темірден, 12X18H10T тоттанбайтын болаттан, ЧС – 42 суперқорытпадан және таза Ti-нан жасылған, үлгі-төсеніштер пайдаланылды, оларға әралуан антикоррозиялық және тозуға төзімді жабындылар жалатылды, бұлар сонан соң коррозиялықбекемдікке сынақтан өткізілді.

$\alpha$  – Fe темірден, ЧС – 42 суперқорытпадан істелген төсеніштер бетін ең тиімді өкдеу, импульстік-плазмалық тозандару әдісімен ПГ-19-01Н ұнтақтан істелген жабынды жалату болып табылатыны көрсетілген.

(Ti-Al)N негізіндегі құрастырған үлпектердің жақсы коррозияға қарсы қасиеттері болатыны айқындалған. Иондық-плазмалық тозандару кезінде алынған, алюминий нитридінің (AlN) үлпегі ең тиімді антикоррозиялық жабынды болып табылатыны белгіленген.

Титан үлгісінің екі жағында жұқа қабатты титан бериллидінің термодиффузиялы пайда болуы сынақ жағдайлар-сүтегіленуден қорғайды.

**ANTICORROSIVE PROPERTIES OF NITRIDES, ALUMINIDES, BERYLLIDES  
OF TITANIUM AND THE COMBINED COATS ON METAL SUBSTRUCTURES**

A.N. Polyakov, E.V. Poddubnaya, V.I. Antonyuk, Z.Z. Imanbekov

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

Methods of X-ray diffraction, electrochemical corrosion and thermal test on durability in an aerosphere of oxygen and hydrogen explored various recordings on the basis of nitrides, aluminides and beryllides of titanium, and also the combined coats on metals. As substructures for coats the exemplars-substrates made of pure  $\alpha$  – Fe, stainless steel 12X18H10T, superalloy ЧС-42 and pure Ti on which various anticorrosive and attrition-resistant coats which then are tested for rust resistance were plotted were used.

It is shown, that by the most effective surfacing of substructures from  $\alpha$  – Fe, superalloy ЧС-42 the conversion coating from powder ПГ-19-01H a method of a pulswise-plasma spraying is.

It is revealed, that good anticorrosive properties have the combined recordings on the basis of (Ti-Al)N.

It is erected, that the most effective antirust coat is the recording of aluminium nitride (AlN), gained at is ionic a-plasma spraying.

Thermal diffusion formation thin layer beryllides of titanium on both legs of a titanium exemplar protects titanium from hydrogen pickup at test limits: T = 500°C, 4 h, pressure H<sub>2</sub> 300 torr.

УДК 539.21;539.12.04

## УЧЕТ ГЛУБИНЫ ПРОНИКНОВЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ПУЧКА ПРИ РЕНТГЕНОФАЗОВОМ АНАЛИЗЕ ОБРАЗЦОВ ТОНКОСЛОЙНЫХ СИСТЕМ

Поддубная Е.В., Поляков А.Н., Слюсарев А.П., Иманбеков Ж.Ж.

*Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан*

В процессе поведения комплексных экспериментальных исследований для выявления роли процессов диффузии и фазовых превращений в создании слоистых материалов на основе бериллия и меди в широком температурном и концентрационном интервалах. Были определены закономерности формирования бериллидов CuBe, BeTi, Be<sub>2</sub>Ti путем рентгенографических исследований диффузии бериллия в Cu и Ti при изотермическом отжиге на поверхности и в объеме образцов. Установлено, что глубина области формирования дифрагированного луча, зависит от угла дифракции при поглощении излучения Cu – K $\alpha$  в исследуемых образцах.

### ВВЕДЕНИЕ

Модифицирование поверхностных слоев изделий из различных сталей и сплавов путем использования многослойных покрытий является одной из важных и перспективных задач физического металловедения. Применение ионно-плазменных технологий позволяет получить композиционные покрытия, последующая термодиффузионная обработка которых формирует многофункциональные тонкослойные системы с уникальным сочетанием физико-химических, механических, жаростойких свойств, с высокой устойчивостью к длительному воздействию водородной среды и т. д.

Нами исследованы процессы диффузионного фазообразования в слоистых системах Be – Ti и Cu – Be. Образцы были получены ионно-плазменным осаждением покрытий из металлов с использованием планарных магнетронных распылительных систем. Основным методом исследования диффузии Be в Ti и Cu, образования бериллидов титана, меди и твердых растворов бериллия в материале подложки при изохронном и изотермическом отжиге тонкослойных образцов была рентгеновская дифрактометрия. Методами рентгеновской дифрактометрии с прецизионной регистрацией дифрактограмм и определениями параметров решеток контролировалось изменение структурного состояния и фазового состава поверхностного слоя и объема образца вследствие термодиффузии.

Рентгенодифрактометрические исследования выполнялись на автоматическом дифрактометре Bruker AXS D8 Advance с цифровой записью результатов измерения. Съемка проводилась в геометрии расходящегося рентгеновского пучка с фокусировкой по Брэггу-Брентано (Б-Б) и в геометрии параллельного рентгеновского луча при скользящем облучении поверхности образца рентгеновским пучком с малым углом падения (Grazing Incidence Attachment – GR). Это позволило получить информацию отдельно о структурно-фазовом составе в объеме вещества до глубины от 3-4 мкм в случае титана и 8-10 мкм в случае меди и в поверхностном слое толщиной до 1 мкм. Применение малых углов падения (от 0,1

до 3°) рентгеновского пучка приводит к существенному уменьшению глубины проникновения рентгеновских лучей и увеличению площади зоны облучения. Рентгенодифрактометрическим анализом определялся фазовый состав образца - форма нахождения основных химических элементов, входящих в состав облучаемого объема веществ и вычислялся параметр элементарной кристаллической ячейки преобладающей фазы [1,2]. Модификация физических свойств поверхности связана со структурно-фазовыми изменениями в приповерхностном слое подложки, толщина которого соизмерима с глубиной проникновения рентгеновских лучей при записи дифрактограмм. Ввиду неоднородности фазового состава по глубине этого слоя, дифракционные эффекты, регистрируемые на различных углах дифракции, характеризуют структурное состояние в соответствующем объеме вещества. Изменение фазового состава по глубине и текстурированность новообразованных кристаллитов интерметаллических фаз искажает соотношение интенсивностей дифракционных максимумов, что учитывалось нами при количественной интерпретации экспериментальных результатов. В случае рентгеноструктурного анализа тонкослойных покрытий не выполняется требование однородности состава по глубине образца и бесконечной толщины, поэтому возможны только полуколичественные определения, показывающие основные тенденции изменения состава анализируемого объема в процессе диффузионных отжигов. На результаты этих определений, кроме того, будут влиять специфические особенности отдельных кристаллических фаз: степень кристалличности, способность к ориентации (текстурирование), образование твердых растворов, влияющее на интенсивность и положение аналитической линии [3,4].

Для обоснованной интерпретации экспериментальных результатов была рассчитана глубина проникновения рентгеновского пучка в образце в виде тонкослойного покрытия бериллия на подложке из меди или титана при съемке дифракционной картины с расходящимся первичным пучком (Б-Б) и с ис-



пользованием устройства малоуглового падения (GR) при использовании излучения Cu K $\alpha$ .

Поглощение интенсивности рентгеновского пучка подчиняется экспоненциальному закону. Эффективная толщина образца при дифрактометрическом анализе зависит от коэффициента поглощения и угла дифракции (рисунок 1).

Интенсивность рентгеновского пучка  $J_1$  на глубине слоя  $x$  равна:

$$J_1 = J_0 \cdot e^{-\mu s}$$

где  $s = x / \sin(\theta)$ ;  $\mu$  - линейный коэффициент поглощения (1/см);

$$\mu = \mu^* \cdot \rho$$

$\mu^*$  - массовый коэффициент поглощения (см<sup>2</sup> / г);  $\rho$  - плотность вещества (г / см<sup>3</sup>);  $J_0$  - интенсивность первичного пучка.

Интенсивность дифракционного луча с этой глубины:

$$J_2 = J_0 \cdot e^{-2\mu s} = J_0 \cdot e^{-2\mu x / \sin \theta}$$

где  $\theta$  - угол дифракции;  $x$  - глубина проникновения луча в образец.

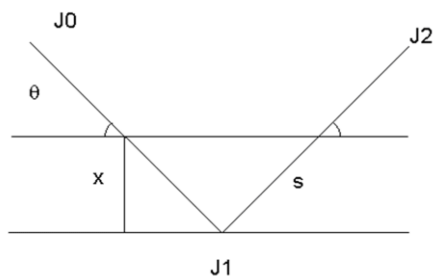


Рисунок 1. Схема формирования дифрагированного луча от поверхностного слоя

Если обозначить  $J_0 - J_2 = G_x$  и принять интенсивность первичного пучка за 1, можно получить:

$$x = K_x \cdot \sin \theta / 2\mu$$

$$K_x = \ln(1 / 1 - G_x)$$

Толщина слоя  $x$ , для которого  $J_2 = 0,01J_0$ , соответствует значению  $K_x = 4,61$  равна:

$$x = 4.61 \cdot \sin \theta^* \cdot \rho \quad (1)$$

Таким образом, по формуле (1) можно вычислить толщину слоя  $x(m)$ , участвующего в формировании интенсивности дифрагированного луча с использованием  $0,99J_0$  интенсивности первичного пучка [3].

Для расчета  $x(e)$  - глубины проникновения первичного пучка при ослаблении интенсивности в  $e$  - раз используется соотношение:

$$J_2 = J_0 / e = 0.3678 \cdot J_0$$

$$G_x = 0,6321$$

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

$$x(e) = \sin \theta / 2 \cdot \mu^* \cdot \rho$$

Зависимость глубины проникновения первичного рентгеновского пучка от угла дифракции  $\theta$  приводит к тому, что объем вещества, участвующий в формировании дифракционного отражения, изменяется для рефлексов с различными индексами  $hkl$ . Это необходимо учитывать при интерпретации результатов рентгенодифрактометрических исследований тонкослойных покрытий, имеющих градиент концентрации по толщине образца.

При скользющем облучении поверхности образца под углом  $\varphi$  (GR) основная часть рентгеновского пучка поглощается в приповерхностном слое толщиной  $x$  (рисунок 2):

$$J_1 = J_0 \cdot e^{-\mu s}$$

Толщина слоя  $x$ , для которого  $J_1 = 0,01 \cdot J_0$ , равна:

$$x = 4.61 \cdot \sin \varphi / \mu^* \cdot \rho$$

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

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

Поскольку угол скольжения  $\varphi \ll \theta$ , дополнительным ослаблением интенсивности  $J_2$  можно пренебречь.

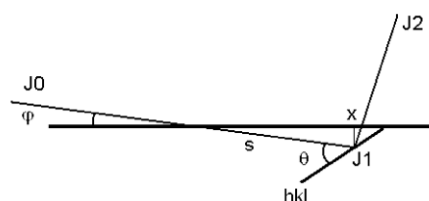


Рисунок 2. Глубина проникновения первичного рентгеновского луча при скользющем облучении под углом  $\varphi$  (Grazing Incidence)

Расчет глубины проникновения излучения Cu - K $\alpha$  в образце меди при регистрации дифрактограмм в геометрии Брэгга - Brentano и скользющем падении первичного пучка

Ниже приводятся теоретически рассчитанные значения  $x(m)$  - максимальной толщины приповерхностного слоя образца, соответствующие 99 % вклада в интенсивность дифрагированного луча и  $x(e)$  - толщины приповерхностного слоя образца, соответствующей ослаблению интенсивности первичного пучка в  $e$  раз (вклад в интенсивность дифрагированного луча при этом составляет 63,2 %).

Расчеты проводились двумя методами: по формуле (1) с учетом поглощения интенсивности рентгеновского пучка (ф.п.) и по программе AbsorbDX V 1.1.2 (пр.) для образца чистой меди Cu;



**УЧЕТ ГЛУБИНЫ ПРОНИКНОВЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ПУЧКА  
ПРИ РЕНТГЕНОФАЗОВОМ АНАЛИЗЕ ОБРАЗЦОВ ТОНКОСЛОЙНЫХ СИСТЕМ**

образца Ве; тонкослойного образца, представляющего собой медную фольгу толщиной 10 мкм с односторонним бериллиевым покрытием толщиной 2,5 мкм, нанесенным методом магнетронного напыления; интерметаллида ВеCu. Физические характеристики меди и бериллия приведены ниже.

Массовый коэффициент поглощения бериллия:

$\mu^* = 1,2$  для излучения Cu K  $\alpha$

Коэффициент гетеродиффузии:

Cu в бериллий (монокристалл):  $T = 972^\circ\text{K}$ ;

$D_{об} = 7,94 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2/\text{с}$

Ве в медь:  $T = 973^\circ\text{K}$ ;  $D_{об} = 2,4 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2/\text{с}$

$T = 1035^\circ\text{K}$ ;  $D_{об} = 1 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2/\text{с}$

Параметр гетеродиффузии:

Ве (монокристалл), диффузия Cu в Ве

$D \perp c$ ;  $T = 972-1273^\circ\text{K}$ ;  $3,5 \cdot 10^{-5} \exp(-192 / RT)$

$D \parallel c$ ;  $T = 972-1273^\circ\text{K}$ ;  $9 \cdot 10^{-5} \exp(-207 / RT)$

$D \perp c$ ;  $T = 693-913^\circ\text{K}$ ;  $4,16 \cdot 10^{-5} \exp(-177 / RT)$

$D \parallel c$ ;  $T = 693-913^\circ\text{K}$ ;  $3,81 \cdot 10^{-5} \exp(-195 / RT)$

Cu - металлическая, диффузия Ве в Cu

$T = 973-1348^\circ\text{K}$ ;  $6,6_{-0,24}^{+0,38} \cdot 10^{-4} \exp(-196 \pm 4,35 / RT)$

Глубина проникновения дифрагированного луча  
Излучение Cu – K $\alpha$ ; поглотитель: Cu ( $D = 8,96 \text{ г}/\text{см}^3$ ;  $\mu^* = 53,7 \text{ см}^2/\text{г}$ )

Ве ( $D = 1,845 \text{ г}/\text{см}^3$ ;  $\mu^* = 1,2 \text{ см}^2/\text{г}$ )

Образец Cu-Ве: Cu – фольга 10 мкм + слой Ве 2,5 мкм

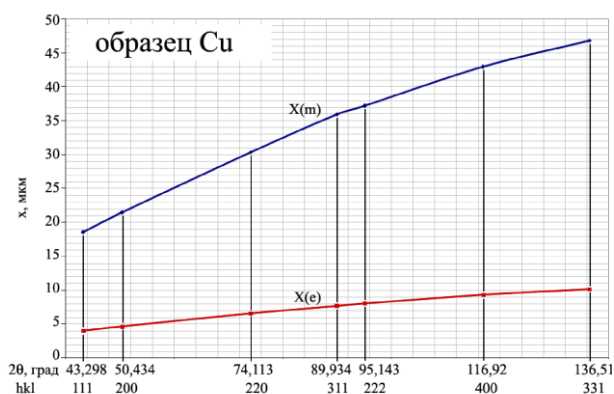
Интерметаллид ВеCu ( $D = 6,054 \text{ г}/\text{см}^3$ ;

$\mu^* = 47,13 \text{ см}^2/\text{г}$ )

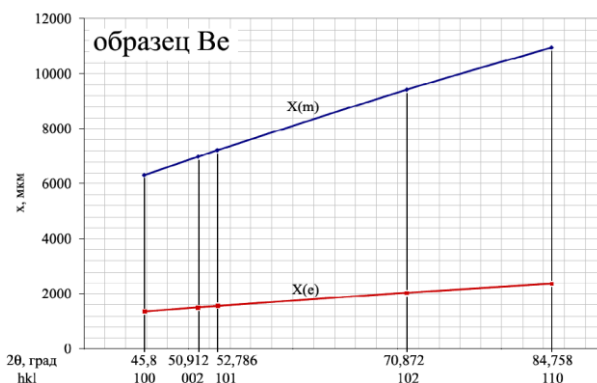
Примечания:

- глубина проникновения равна  $x(m)$  – при  $I_2 = 0,01 \cdot I_0$  (99 % использования первичного пучка);
- глубина проникновения  $x(e)$  – при ослаблении первичного пучка в  $e$ - раз.

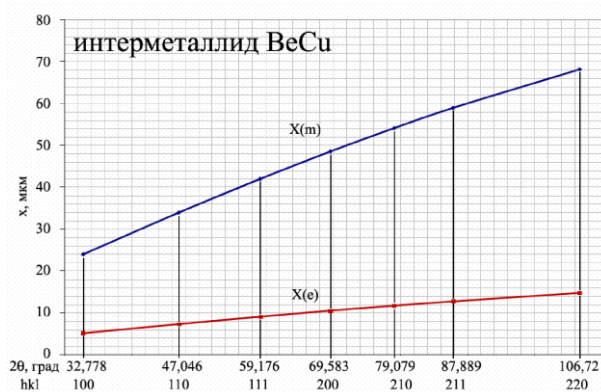
Изменение глубины проникновения первичного рентгеновского пучка в тонкослойный образец Cu-Ве в зависимости от толщины нанесенного на медную подложку слоя бериллия было рассчитано для двух дифракционных отражений в области средних углов дифракции от материала подложки – меди и появившейся после отжига фазы ВеCu.



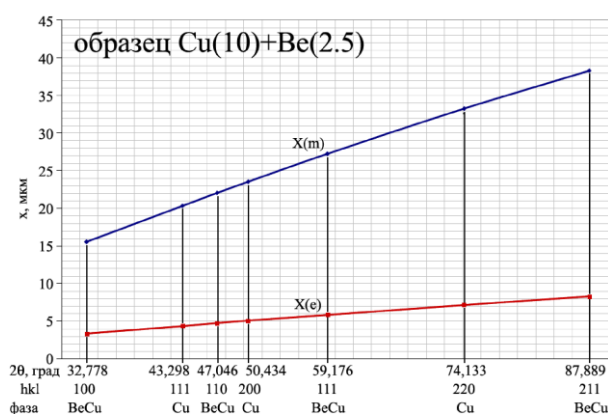
а



б



в



г

Рисунок 3. Расчет глубины проникновения для образцов Cu, Ве, ВеCu, Cu(10)+Ве(2.5)

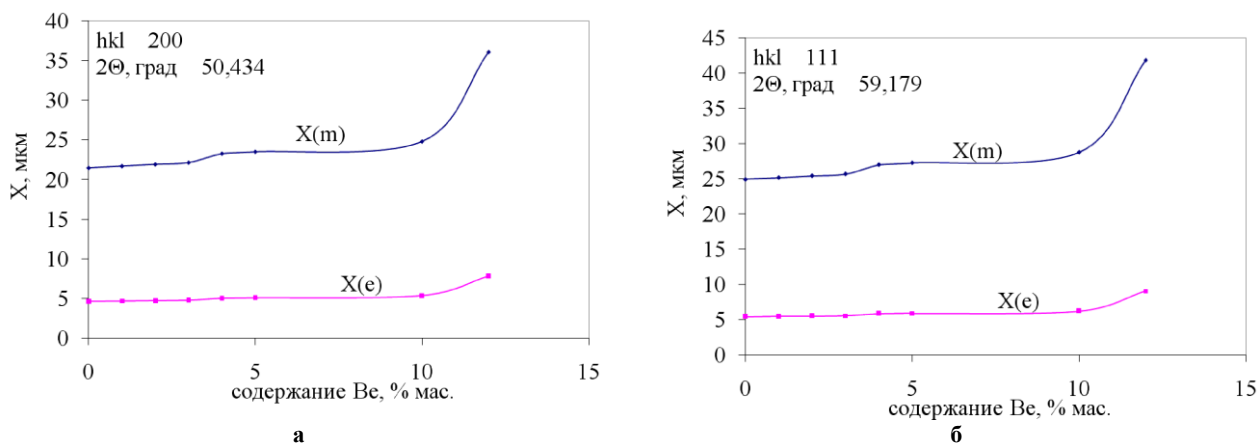


Рисунок 4. Зависимость глубины проникновения первичного рентгеновского луча  $x$  от содержания Be в тонкослойном образце Cu-Be

Таким образом, расчетная глубина проникновения дифрагированного рентгеновского луча в тонкослойном образце: 10 мкм меди + 2,5 мкм бериллия в зависимости от угла дифракции и степени ослабления изменяется от 15 до 38 мкм. При ослаблении в  $(e)$  – раз глубина проникновения составляет 3 – 8 мкм, т.е. сравнима с толщиной подложки. Поэтому при записи дифрактограммы со стороны подложки могут регистрироваться ослабленные дифракционные максимумы фаз, образованных на поверхности образца со стороны бериллиевого покрытия. Это необходимо учитывать при изучении процессов диффузии и фазообразования в слоистых материалах на основе бериллия и меди [5]. В качестве иллюстрации приводятся некоторые результаты изучения изотермического отжига тонкослойного образца Cu – Be.

Отжиг при температуре  $T = 500^\circ\text{C}$  приводит к интенсивной диффузии бериллия в медную подложку, в результате чего кристаллизуются бериллиды  $\text{Be}_2\text{Cu}$  и  $\text{CuBe}$ . При этом наблюдается расщепление дифракционных рефлексов  $\text{Be}_2\text{Cu}(111)\text{-a}$  и  $\text{Be}_2\text{Cu}(111)\text{-b}$ ,  $\text{Be}_2\text{Cu}(220)\text{-a}$  и  $\text{Be}_2\text{Cu}(220)\text{-b}$ , соответствующее диапазону гомогенности этой фазы. Аналогичная картина проявляется с рефлексами меди: наложение рефлекса Cu (220) и Cu(Be) (220) твердого раствора бериллия в меди. На дифрактограмме, записанной со стороны медной подложки, присутствуют рефлексы только твердого раствора бериллия в меди и  $\gamma$  – фазы (BeCu), причем отчетливо проявляется двухфазность твердого раствора по форме рефлекса 311. Для проверки влияния диффузии бериллия на тыльную поверхность подложки записана дифрактограмма со скольльзящим облучением образца.

На рисунке 5 сравниваются результаты съемки дифракционной картины с расходящимся первичным пучком (Б-Б) и с использованием устройства малоуглового падения (GR). Угол падения рентгеновского пучка равнялся  $2^\circ$ , что существенно уменьшило глубину проникновения рентгеновских лучей. Аналогичная форма рентгеновского рефлекса меди 311, регистрируемого обоими методами, показывает

отсутствие заметного градиента концентрации бериллия по глубине образца со стороны медной подложки. В то же время, расщепление дифракционного максимума, остающееся после вычитания  $K_{\alpha 2}$  – компоненты дублета, может быть связано с присутствием в анализируемом объеме зерен кристаллов твердого раствора Cu(Be) с различным содержанием бериллия под влиянием частичной закалки при охлаждении образца.

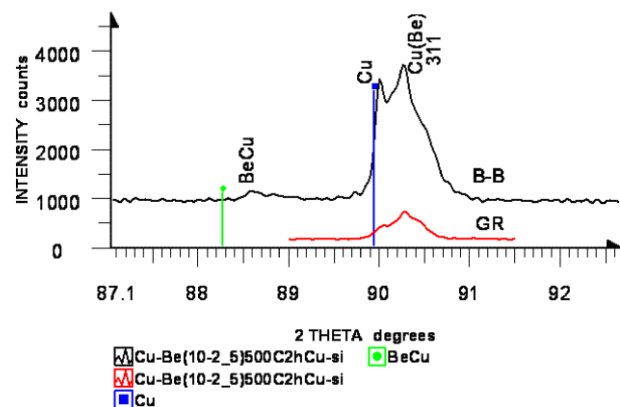


Рисунок 5. Сравнение состава объемной и поверхностной (GR) части образца Cu-Be (10-2,5) 500C 2h Cu -side со стороны подложки

В результате диффузии бериллия в медную подложку образуется двухфазная система из твердого раствора бериллия в меди и  $\gamma$  – фазы BeCu. Дифракционные линии этих фаз наблюдаются при записи дифрактограмм с обеих сторон образца вследствие большой глубины проникновения первичного рентгеновского пучка формирования дифрагированного луча. По мере увеличения продолжительности изотермического отжига от 0,5 час до 20 час возрастает содержание твердого раствора Cu(Be) и снижается – бериллида BeCu. При этом наблюдается двухфазность твердого раствора, проявляющаяся расщеплением дифракционного рефлекса Cu(Be) 311 с  $d = 1.08 \text{ \AA}$ .

Расчет глубины проникновения излучения  $\text{Cu-K}\alpha$  в образце титана при регистрации дифрактограмм в геометрии Брэгга – Брентано и скользящем падении первичного пучка

Расчитана глубина проникновения в образец  $\text{Ti}$  – фольги рентгеновского пучка при съемке дифракционной картины с расходящимся первичным пучком (геометрия (Б-Б)) и с использованием устройства малоуглового падения (GR).

Расчет глубины проникновения рентгеновского пучка в  $\text{Ti}$  – подложку.

Физические характеристики титана приведены ниже:

$$T_{\text{пл}} = 1668^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Плотность } 4,5 \text{ г/см}^3$$

$$\text{Атомная масса } 47,867 \text{ а.е.м.}$$

$$R_{\text{ат}} = 2,0 \text{ \AA}; R_{\text{ков}} = 1,32 \text{ \AA}$$

$$\text{Массовый коэффициент поглощения:}$$

$$\mu^* = 205,1 \text{ см}^2/\text{г}$$

$$\text{Линейный коэффициент поглощения:}$$

$$\mu = 923,2 \text{ 1/см для излучения Cu K}\alpha$$

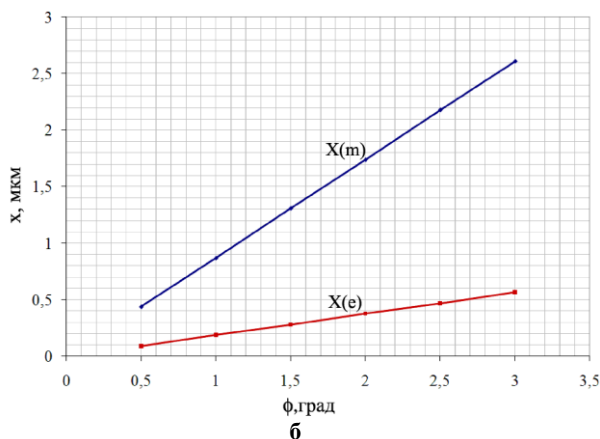
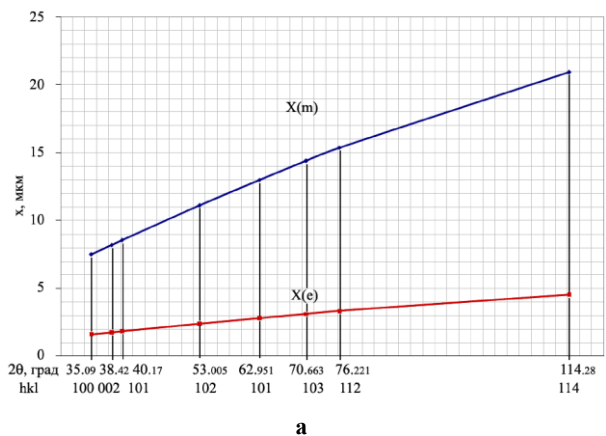


Рисунок 6. Расчет глубины проникновения в образце титана при регистрации дифрактограмм в геометрии Брэгга – Брентано (ББ) (а) и при малоугловом падении рентгеновского луча (GR) (б)

Таким образом, глубина области формирования дифрагированного луча, соответствующая наибольшему вкладу в его интенсивность при съемке дифракционной картины с расходящимся первичным

пучком (Б-Б) изменяется в пределах 1,6 – 4,5 мкм в зависимости от угла дифракции. Следовательно, проявление на дифрактограмме изменений формы или положения рефлексов в области больших углов дифракции указывает на увеличение глубины слоя, в котором происходит изменение периода решетки и структурного состояния подложки после термической обработки. Использование устройства малоуглового падения (GR) позволяет исследовать тонкослойные покрытия с глубиной проникновения рентгеновского пучка 0,1 – 0,5 мкм.

Сравнение структурного состояния объемной (Б-Б) и поверхностной (GR) части образца титановой фольги с односторонним слоем бериллия:  $\text{Ti}$  (10) +  $\text{Be}$  (2)  $\text{Be}$ -side (рисунок 4) при рентгенодифрактометрическом изучении диффузии и фазовых превращений в слоистой системе бериллий – титан в процессе термических отжигов позволяет контролировать исходное структурное состояние материала  $\text{Ti}$  – подложки после прокатки фольги, особенности перекристаллизации титана на двух сторонах в процессе отжига, отслеживать изменение положения, интенсивности и формы дифракционных отражений, связанное с диффузией бериллия [6].

Результаты съемки дифракционных картин двух сторон образца с использованием устройства малоуглового падения (GR) и в геометрии с расходящимся первичным пучком (Б-Б) показывают распределение фаз по глубине образца и различие состава объемной части и тыльной поверхности образца.

После регистрации в двух рентгеновских режимах с различной геометрией: (Б-Б) и (GR), дифрактограммы каждого образца обрабатывались по одинаковой схеме:

а) первичная цифровая обработка включала в себя построение модельной дифрактограммы с применением Фурье – преобразования; уровень аппроксимации подбирался таким образом, чтобы не происходило снижения интенсивности и увеличения ширины отражений компонентов дублета  $K_{\alpha 1}$  –  $K_{\alpha 2}$  рефлексов при заметном снижении флуктуаций фона;

б) вычитание  $K_{\alpha 2}$  – компоненты дублета;

в) определение положения дифракционных максимумов и их интенсивностей;

г) определение дифрактометрических характеристик образцов  $\text{Ti}$  – фольги с односторонним  $\text{Be}$  – покрытием после диффузионных отжигов: полной ширины на половине максимума рефлекса (FWHM); интегральной ширины рефлексов (I. Breadth); положение центра тяжести рефлекса (Gravity C.) и соответствующего межплоскостного расстояния d (Gravity C.); площадь рефлекса (Net Area).

Сравнение дифрактограмм, записанных в геометрии параллельного пучка при малоугловом облучении образца и в геометрии Брэгга-Брентано (рисунки 8, 9) позволило установить ориентационные эффекты формирования  $\text{Be}$  – слоя при магнетронном способе нанесения. Слой бериллия толщиной 2 мкм

проявляется только на дифрактограмме, записанной в режиме GR, что указывает на плохую окристаллизованность и текстурированность кристаллитов бериллия. При скользящем падении рентгеновского пучка (GR) на дифрактограмме образца, записанной со стороны Be – слоя, регистрируется рефлекс Be (002). Ориентировка кристаллитов Be при магнетронном напылении слоя на ионно-плазменной установке происходит таким образом, что кристаллографическая плоскость Be (002) не совпадает с плоскостью поверхности подложки.

Учитывая сложность происходящих изменений структурного состояния Ti – подложки и Be – слоя, влияния большого числа неопределенных факторов на точность определения содержания бериллия в виде твердого раствора в  $\alpha$  – Ti и в фазе BeTi, для контроля термической диффузии бериллия в титановую подложку и фазообразования использовалась площадь дифракционного рефлекса Be (002), измеренного при скользящем облучении тонкослойного образца.

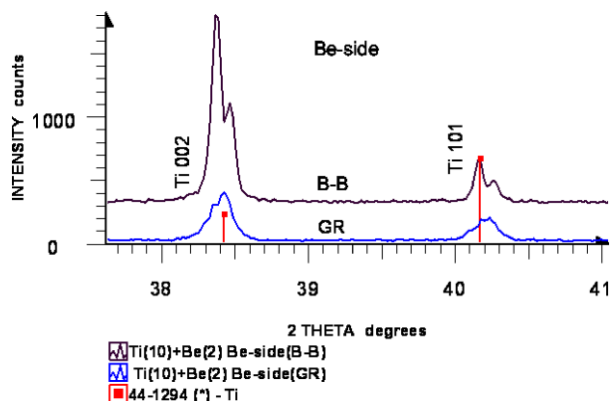


Рисунок 7. Сравнение структурного состояния объемной (Б-Б) и поверхностной (GR) части образца титановой фольги с односторонним слоем бериллия: Ti (10) + Be (2) Be -side

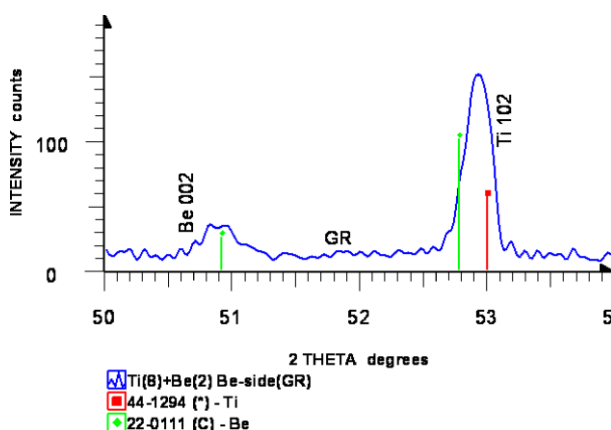


Рисунок 8. Фазовый состав поверхностной (GR) части образца титановой фольги с односторонним слоем бериллия: Ti (8) + Be (2) Be -side

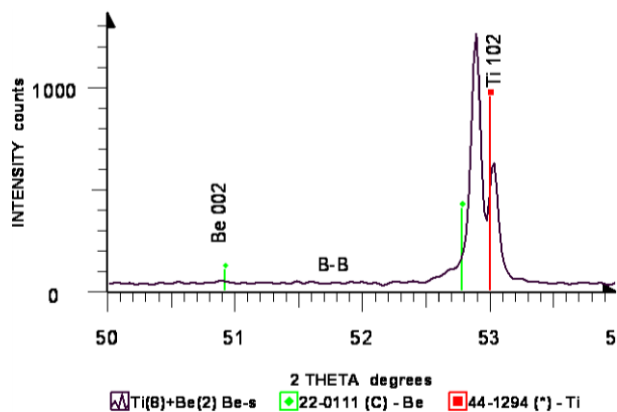


Рисунок 9. Фазовый состав объемной (Б-Б) части образца титановой фольги с односторонним слоем бериллия: Ti (8) + Be (2) Be -side

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рентгенографические исследования диффузии бериллия в Cu и Ti при изотермическом отжиге тонкослойных образцов позволили выявить закономерности формирования бериллидов CuBe, BeTi и Be<sub>2</sub>Ti [5,6].

Установлено, что глубина области формирования дифрагированного луча, зависит от угла дифракции при поглощении излучения Cu – K $\alpha$  в образце титана.

Проведены численные расчеты глубины проникновения дифрагированного рентгеновского луча в процессе регистрации дифрактограмм в системе Cu-Be. При ослаблении в  $e$  раз глубина проникновения составляет от 1,6 – 4,5 до 8 – 10 мкм, т.е. сравнима с толщиной подложки. Это дало обоснование тому факту, почему при записи дифрактограммы со стороны подложки могут регистрироваться ослабленные дифракционные максимумы фаз, образованных на поверхности образца с бериллиевым покрытием.

Установлено, что дифракционные линии этих фаз наблюдаются при записи дифрактограмм с обеих сторон образца вследствие большой глубины проникновения первичного рентгеновского пучка формирования дифрагированного луча.

На основании учета глубины проникновения можно выработать рекомендации по режимам термодиффузионным отжигам для формирования необходимых концентрационных соотношений бериллидов в тонкослойной системе. Благодаря расчетам, полученным в результате данной работы можно контролировать глубину образования различных фаз, BeTi и Be<sub>2</sub>Ti или изменение концентрации твердых растворов.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Горелик, С.С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ./ С.С. Горелик, Ю.А. Скаков, Л.Н. Расторгуев – М.: МИСИС, 2002. – 360 с.
2. Русаков, А.А. Рентгенография металлов./ А.А. Русаков. - М. : Атомиздат, 1977, 480с.
3. Рентгеноструктурный анализ глинистых минералов / И.Н. Ушатинский [и др.] // Методика и результаты изучения минералогии глин продуктивных отложений Западно-Сибирской низменности в связи с их нефтегазоносностью. Тр. ЗапСибНИГНИ, вып. 35. Тюмень, 1970. С. 27 – 64.
4. Хейкер, Д.М. Рентгеновская дифрактометрия./ Д.М. Хейкер, Л.С. Зевин - М., Физматгиз, 1963. 380 с.
5. Исследование процессов фазообразования в слоистой системе Cu – Be при изохронных отжигах и их компьютерное моделирование./ А.П. Слюсарев [и др.]// Проблемы современного материаловедения: Труды XII сессии Научного совета по новым материалам Международной ассоциации академий наук (25 мая 2007 г., г. Киев). – Гомель: ИММС НАНБ, 2008. – С. 80 – 86.
6. Фазообразование в тонкослойной системе Be-Ti/ Е.В. Поддубная [и др.] // Вестник НЯЦ РК. – 2008. – вып. – С. 80 – 83.

#### **ЖҰҚА ҚАБАТТЫ ЖҮЙЕЛЕР ҮЛГІЛЕРІН РЕНТГЕНФАЗАЛЫҚ ТАЛДАУ КЕЗІНДЕ РЕНТГЕНДІК ШОҚТЫҢ ЕНУ ТЕРЕҚДІГІН ЕСЕПКЕ АЛУ**

**Поддубная Е.В., Поляков А.Н., Слюсарев А.П., Иманбеков Ж.Ж.**

*ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан*

Температуралық және концентрациялық кең аралықта бериллий мен мыс негізінде қабатты материалдар жасаудағы диффузия процестерінің және фазалық түрленулердің рөлін анықандау үшін комплексі эксперименттік зерттеулер жүргізу барысында CuBe, BeTi, Be<sub>2</sub>Ti бериллидтерінің қалыптасу заңдылықтары үлгілердің бетінде және көлемінде изотермдік күйдірген кезде Cu мен Ti-ға бериллий диффузиясына рентгенографиялық зерттеулер жүргізу арқылы анықталды. Дифракцияланған сәуленің қалыптасу саласының тереңдігі зерттелетін үлгілерде Cu-K<sub>α</sub> сәулелері жұтылған кездегі дифракция бұрышына тәуелді екені табылған.

#### **THE ACCOUNT OF DEPTH OF PERMEATION OF THE X-RAY BUNCH AT X-RAY THE ASSAYING OF SAMPLES THIN-LAYER OF SYSTEMS**

**E.V. Poddubnaya, A.N. Polyakov, A.H. Slyusarev, J.J. Imanbekov**

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

During behaviour of complex experimental researches for revealing a role of processes of diffusion and phase transformations in creation of laminar materials on the basis of a beryllium and cuprum in wide temperature and concentration intervals. Laws of formation of oxides beryllium CuBe, BeTi, Be<sub>2</sub>Ti by radiographic explorations of diffusion of a beryllium in Cu and Ti have been certain at isothermal annealing on a surface and in volume of samples. It is established, that depth of area of formation diffract a beam, depends on a corner of diffraction at absorption of radiation Cu - K in investigated samples.

УДК 533.9.08;621.039.66

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ ТОКАМАКА КТМ

Колокольцов М.В., Шаповалов Г.В., Коровиков А.Г., Чудинова М.В.,  
Шипилов П.В., Макаров Д.А., Кретинин А.А., Шипилов Д.В.

*Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

Описан прототип системы программного обеспечения для преобразования и представления экспериментальных данных физических диагностик токамака КТМ. Программное обеспечение выполнено на основе Java и Web технологий и предназначено для анализа и управления данными в послеекспериментальный период.

### ВВЕДЕНИЕ

Приближается к завершающей стадии строительство Казахстанского материаловедческого токамака КТМ. Ведется монтаж установки и технологических систем, калибруются физические диагностические системы, создаются для исследования поведения материалов первой стенки и дивертора в потоках тепла и частиц плазмы, близких по параметрам к международному термоядерному реактору ИТЕР.

Для проведения на КТМ экспериментов и получения достоверной информации о физических процессах и параметрах плазмы с учетом решения задач материаловедения предполагается использовать довольно большое количество диагностических систем, близкое по составу к ИТЕР. Объем получаемой за разряд информации будет достигать 8 Гб. Информация будет включать в себя зарегистрированные сигналы диагностических систем, рассчитанные на их основе плазменно-физические параметры, видеофайлы и изображения. Одним из самых востребованных видов данных установки будут результаты измерений систем физических диагностик.

Инструменты хранения и визуализации данных создаваемой в рамках проекта КТМ системы автоматизации экспериментов (САЭ) ориентированы в первую очередь на обеспечение надежного функционирования установки и проведение экспресс-анализа полученных экспериментальных данных в межрядовых паузах. Углубленный анализ данных и управление ими в период между кампаниями потребует наличия системы более специализированных инструментов хранения и визуализации данных, включающих в себя средства для автоматизации создания отчетной документации, интеграции с математическими пакетами, обмена данными со специалистами, занятыми в области термоядерных исследований. Данная система дополнит САЭ КТМ и существенно повысит эффективность работы с экспериментальными данными.

Целью работы являлась разработка прототипа подобной системы преобразования и представления экспериментальных данных для проведения исследований на установке КТМ.

### ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ДИАГНОСТИК ТОКАМАКА КТМ

Как уже отмечалось выше, работа с экспериментальными данными диагностических систем исследовательских установок, функционирующих в импульсном режиме - в том числе и токамаков, - чаще всего происходит в два этапа. Первый этап относится ко времени экспериментальных кампаний, основной его задачей является получение достигнутых за цикл физических параметров и экспресс анализ информации для принятия решений о дальнейших экспериментах. Второй связан с углубленным анализом экспериментальных данных, их документированием и управлением ими. Эти работы проводятся в период между экспериментальными кампаниями.

Автоматизация подобных работ является весьма актуальной задачей. В той, или иной степени она может быть решена существующими и успешно применяющимися на современных установках токамак программными средствами, например, такими как MDSPlus, DASTOOLS.

Однако, каждая установка токамак создается с определенной целью, обладает уникальным набором диагностик и эксплуатируется в особых, только ей свойственных условиях. Таким образом, применение сторонних стандартов на форматы и способы доступа к экспериментальным данным может оказаться эффективным далеко не всегда. Информационная система, безусловно, должна поддерживать наиболее распространенные форматы хранения данных, однако при этом желательно избежать возможных ограничений идеологическими и технологическими рамками, в которые эти стандарты ее облекают. Кроме того, на информационную систему накладывает отпечаток тот факт, что установки, для которых они создаются, являются экспериментальными и требования к преобразованию и представлению данных постоянно расширяются. Подобная система необходима еще до ввода установки в эксплуатацию, поскольку большое количество задач, связанных с анализом полученных экспериментальных данных диагностических систем приходится решать уже на этапе настройки и калибровки диагностик.



Для определения требований к системе преобразования и представления данных был проведен опрос специалистов, занятых в работе с диагностическими системами КТМ. Параллельно ему проводился анализ нескольких систем преобразования и представления экспериментальных данных установок токамак. Анализились функциональные возможности систем, способы структуризации данных и работы с информацией, графический пользовательский интерфейс, используемые технологии. На основании полученных в результате этих работ данных, были сформулированы требования к программному обеспечению преобразования и представления данных физических диагностик. Основные из них следующие:

- хранение и визуализация экспериментальных данных, зарегистрированных сигналов диагностических систем и результатов обработки в виде таблиц, графиков, видео и изображений; возможности расширения форм визуализации;
- сопоставление данных из различных экспериментов;
- поиск данных по параметрам экспериментов и их описаниям;
- математическая обработка данных (сглаживание, фильтрация, вычитание постоянной наводки, и т.д.) и расширения способов обработки;
- автоматическая генерация отчетов по экспериментальным данным, экспорт их в офисные приложения;
- возможность взаимодействия с общей базой данных КТМ и с данными в наиболее распространенных форматах хранения экспериментальной информации токамаков;

Поскольку требования к системе преобразования и представления данных экспериментальной установки определяются исследованиями, проводящимися на ней, а программы и направления последних чаще всего значительно изменяются, архитектура системы должна быть гибкой, расширяемой и доступной для дальнейшего развития.

Одним из решений, которые в подобных условиях может предложить современный мир информационных технологий, является организация программного обеспечения (ПО) в виде так называемой трехзвенной структуры на основе JAVA-технологий. Такой подход позволяет создать легко расширяемую и переносимую систему, обеспечивающую выполнение различных операций с данными и доступ к ним. Также JAVA интегрируется с математическими пакетами (MATLAB, SCILAB), и имеет средства для связи с другими кроссплатформенными средствами разработки ПО.

### АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДИАГНОСТИК В МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ НА ТОКАМАКЕ КТМ

На основании представленных выше требований был разработан вариант архитектуры системы, показанный на рисунке 1.



Рисунок 1. Архитектура системы преобразования и представления экспериментальных данных диагностик

Система состоит из серверной и клиентской части. Серверная часть, отвечающая за хранение информации и доступ к ней, представляет собой базу данных (БД) и сервер приложений. Сервер содержит результаты обработки данных, сформированные по итогам экспериментов документы, взаимодействует с базой данных, в которой хранится исходный массив информации, полученной за разряд, а также с БД действующих токамаков, осуществляет поиск и обработку данных. Доступ к данным осуществляется при помощи клиентских приложений, которые копируют необходимые данные на локальный компьютер, содержат функции математической обработки и экспорта информации в офисные приложения.

В БД содержится обработанная информация. Сигналы хранятся в виде бинарных объектов, с указанием настроек параметров системы сбора данных (частота дискретизации, количество отсчетов и др.). При этом структура базы данных позволяет хранить как зарегистрированные, так и обработанные сигналы, события, произошедшие за время разряда, описание аппаратных средств и свойств сигнала. Для хранения сложных типов данных (изображения, видео) предусмотрена специализированная таблица. Имеются также таблицы, предназначенные для хранения сформированных пользователями диаграмм, описаний экспериментов, комментариев. С целью оптимизации работы с данными и обмена информацией со сторонними системами для описания аппаратных средств используется формат XML.



Сформированные исследователями диаграммы, материаловедческая информация, комментарии, различного рода документация также помещается в базу данных. Базы данных приведена к третьей нормальной форме, т.е. структурирована способом, по-

зволяющим устранить избыточность данных, а также сохранять ссылочную целостность в базе данных. Выполнение нормализации обеспечивает гибкость и эффективность при хранении данных [1, 2]. Структура базы данных показана на рисунке 2.

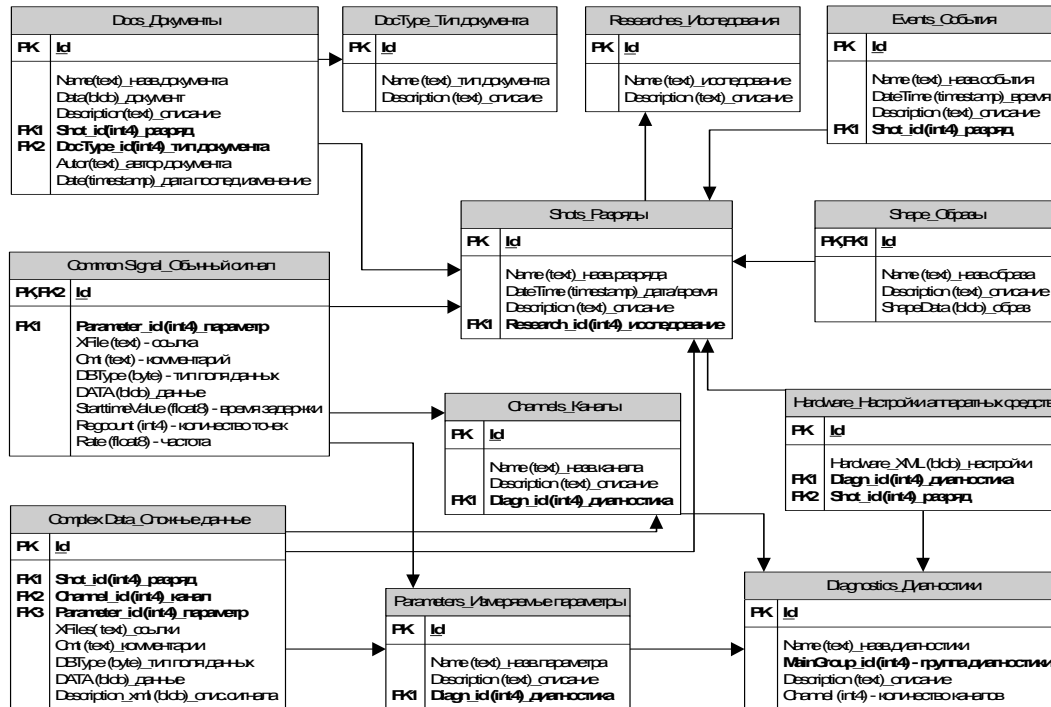


Рисунок 2. Структура серверной базы данных

Для управления соединениями, централизации и оптимизации взаимодействия с данными, интеграции с существующими информационными системами токамаков в составе системы предусмотрен сервер приложений.

Сервер приложений принимает запросы на получение и обработку данных. Он также осуществляет выборку информации из базы обработанных данных, производит, при необходимости, дополнительную математическую обработку, генерирует отчетную документацию. Серверное приложение включает в свой состав контура для работы с математическими пакетами, офисными приложениями, системами обмена данными.

Доступ к данным осуществляется при помощи клиентского приложения, представляющего интерфейс ко всей функциональности системы. С его помощью пользователь может (при наличии прав) работать со всеми имеющимися данными, как в общей БД, так и в подключенных к серверу приложений системах. Для экономии сетевого трафика в клиентское приложение включены функции буферизации запрошенной информации на клиентском компьютере.

Таким образом, система обработки и представления экспериментальных данных, реализованная на основе представленной модели функционально дополняет систему автоматизации эксперимента тока-

мака КТМ. Для визуализации физических процессов исследователь получает возможность воспользоваться всей имеющейся информацией, будь то зарегистрированные сигналы или результаты обработки данных. Все компоненты системы при необходимости могут быть расширены, функциональность системы может быть увеличена.

**ПРОТОТИП СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ**

На основе описанной ранее архитектуры был разработан прототип системы преобразования и представления данных. Было решено выполнить комплекс ПО в виде серверной WEB-службы на основе JAVA-серветов и клиентского настольного приложения.

В разработке были использованы следующие инструменты и технологии:

- СУБД PostgreSQL – из доступных для бесплатного использования систем управления базами данных (СУБД) PostgreSQL является одной из наиболее функционально развитых и надежных; в разработке PostgreSQL была использована в качестве серверной СУБД;
- JAVA – в настоящее время данный продукт является уже не просто языком программирования, но и набором технологий, позволяющим в сжатые сроки разворачивать эффективные серверные приложения, функционирую-

- щие в WEB; JAVA был использован для разработки серверного приложения, связывающего базы данных и клиентские приложения;
- APACHE TOMCAT – открытый контейнер JAVA-сервлетов, разработанный на языке JAVA, осуществляющий базовую функциональность по управлению соединениями на сервере; отличается надежностью и эффективностью, доступен для бесплатного использования; TOMCAT был установлен на сервере в качестве контейнера для серверного приложения;
  - SOAP – протокол обмена данными клиент-сервер, базирующийся на основе XML, используется в WEB-службах; данный протокол позволяет наладить безопасный, открытый, кроссплатформенный, легко расширяемый функционально обмен данными; был использован для обмена данными между серверной и клиентской частями системы;
  - APACHE AXIS – библиотека, реализующая протокол SOAP в серверной части;
  - DELPHI – средство быстрой разработки ПО, эффективное при создании сложных и многофункциональных графических интерфейсов; версия из пакета BORLAND DEVELOPER STUDIO 2006 была использована для разработки клиентского приложения;
  - SDAS – открытая система обмена опубликованными экспериментальными данными токамаков, разработанная специалистами Центра Ядерного Синтеза (Португалия). Компоненты SDAS были включены в серверную часть системы для обеспечения обмена данными с авторизованными пользователями.
  - OPENOFFICE – открытый комплекс ПО для автоматизации офисных работ (в некоторых случаях может рассматриваться как альтернатива MICROSOFT OFFICE). Доступен для бесплатного использования. Применялся в серверной части системы для автоматизации создания отчетной документации.
  - SCILAB – открытый математический пакет, использовался на серверной части для обработки данных.

Структура системы преобразования и представления экспериментальных данных физических диагностик показана на рисунке 3.

Система функционирует следующим образом. После проведения разряда в установке КТМ данные физических диагностик из общей базы данных КТМ копируются в БД системы обработки и представления, где они структурируются в контексте физических процессов в токамаке, при необходимости проводится дополнительная их обработка. Далее в автоматическом режиме создаются наборы данных для отображения, оформляются экраны данных, генерируется отчетная документация, которая также добавляется в

БД системы обработки и представления. Пользователь из клиентских приложений может просмотреть, как данные текущего разряда, так и информацию результаты отдаленных по времени компаний, взятых из БД обработки и представления. Также при необходимости пользователь может получить доступ к данным внешних информационных систем токамаков. При этом нагрузка по поиску и обработке информации распределяется между двумя системами – САЭ КТМ и системой обработки и представления так, что ресурсоемкие операции по поиску необходимой информации во внутренних и внешних БД не влияют на возможность проведения дальнейших разрядов КТМ. Кроме того, на сервере системы преобразования и представления могут быть запущены экспериментальные методы обработки данных, что также никак не повлияет на производительность САЭ КТМ и время проведения разрядов. Идеологически и технически работа с информацией разделяется на два уровня – уровень данных текущего разряда, и уровень послепусковой обработки.

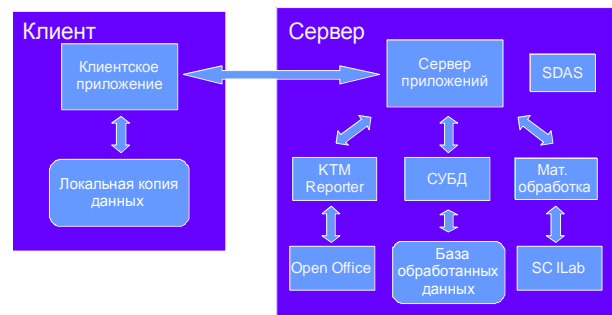


Рисунок 3. Структура системы преобразования и представления экспериментальных данных физических диагностик КТМ

Также исследователи могут получить сформированные сервером на основании экспериментальных данных отчетные документы. Завершив анализ данных и получив информацию, исследователи могут разместить ее в доступной внешним системам базе данных SDAS и таким образом продемонстрировать своим удаленным коллегам полученные результаты.

При этом интерфейс к системе представлен в виде одного клиентского приложения, снимок экрана которого показан на рисунке 4. Таким образом, исследователь получает возможность работать со всеми доступными ему данными в одной среде.

Ниже перечислена основная функциональность разработанной системы:

- хранение и визуализация экспериментальных данных, зарегистрированных сигналов и результатов обработки в виде таблиц и графиков, мультимедиа-информации;
- возможность сопоставления данных из различных экспериментов;
- поиск данных по параметрам экспериментов и их описаниям;

- математическая обработка данных (сглаживание, фильтрация, вычитание постоянной наводки, и т.д.);
- возможность выборки временных окон из зарегистрированных сигналов, изменения частоты дискретизации;
- автоматическая генерация отчетов по экспериментальным данным, экспорт их в офисные приложения;
- возможность взаимодействия с действующими информационными системами токамаков, подключенными к SDAS.

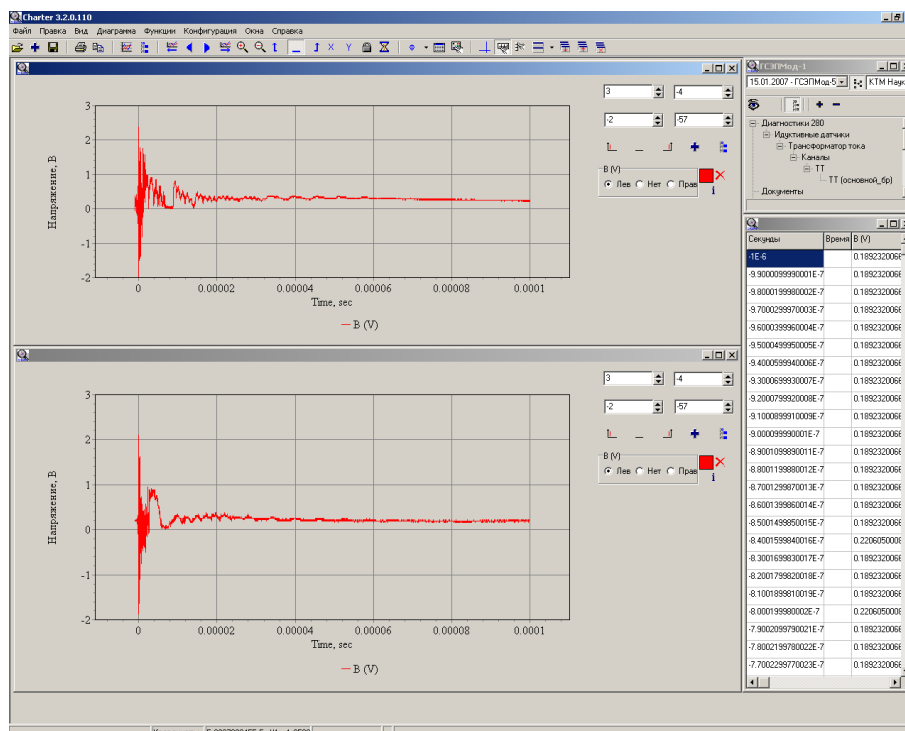


Рисунок 4. Снимок экрана клиентского приложения визуализации данных

Функциональность в компонентах системы определяется следующим образом: серверное приложение взаимодействует с серверной БД, содержит функции выборки временных окон из сигналов и изменения частоты дискретизации, компоненты математической обработки; клиентское приложение позволяет осуществлять визуализацию данных, производить несложную математическую обработку, экспортировать данные в MS EXCEL, MS WORD, а также текстовые и двоичные файлы.

Все эти возможности позволяют осуществлять необходимый набор базовых функций для работы с экспериментальными данными физических диагностик. Архитектура системы позволяет при необходимости расширять способы визуализации данных и методы их обработки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе выполнения работ была сформирована идеология работы с экспериментальными данными токамака КТМ, создана WEB-служба, предназначенная для решения задач, связанных с вторичной обработкой экспериментальных данных, хранением их, и сопутствующей документацией, поиском информации, организацией обмена данными, автоматической генерацией отчетов. При этом пер-

вичными данными для службы является информация из базы данных результатов экспериментов, входящей в состав системы автоматизации экспериментов установки КТМ.

По итогам выполнения работ можно сделать следующие выводы:

- разработанная система преобразования и представления данных реализует базовый набор функциональности, необходимый для управления экспериментальными данными физических диагностик токамака КТМ. Система может являться неким каркасом, вокруг которого при необходимости может быть построена дополнительная функциональность (в том числе и компоненты для так называемого “data mining”) увеличивающая возможности системы и повышающая эффективность исследований;
- в разработке было использовано по большей части, кроссплатформенное, доступное для бесплатного использования ПО, что с одной стороны, уменьшает стоимость системы, а с другой оставляет возможности для миграции с ОС WINDOWS на LINUX на и наоборот; таким образом, повышается устойчивость системы преобразования и представления данных к возможным изменениям на рынке ПО;

- разработанное ПО успешно использовалось в работах по проверке и калибровке физических диагностик токамака КТМ и продемонстрировало достаточную эффективность при работе с подобного рода данными.

Следующим шагом в реализации проекта предполагается интеграция разработанной системы в САЭ КТМ. Система обработки и представления экс-

периментальных данных физических диагностик существенно расширит функциональность САЭ КТМ, обеспечит унифицированный доступ к экспериментальным данным как КТМ, так и других действующих токамаков, оптимизирует работу занятых в исследованиях специалистов, повысит ее качество и снизит стоимость.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гарсия-Молина, Г. Системы баз данных. полный курс / Г. Гарсия-Молина, Д. Ульман, Д. Уидом. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2004. – 1088 с.
2. Ларман, К. Применение UML и шаблонов проектирования / К. Ларман. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2004. – 736 с.

### КТМ ТОКАМАК ДЕРЕКТЕРІН ҰСЫНУ ЖӘНЕ ТҮРЛЕНДІРУДІҢ БАҒДАРЛАМАЛЫҚ ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУІ

**Колокольцов М.В., Шаповалов Г.В., Коровиков А.Г., Чудинова М.В., Шипилов П.В., Макаров Д.А., Кретинин А.А., Шипилов Д.В.**

*ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан*

КТМ токамагын физикалық диагностигінің эксперименталды деректерді ұсыну және түрлендіру үшін бағдарламалық қамтамасыздандыру жүйесінің түп тұлғасы сипатталды. Бағдарламалық қамтамасыздандыру Java және Web негізінде орындалды және эксперименттіктен кейінгі кезеңде деректермен меңгеру және талдау үшін арналған.

### SOFTWARE OF TRANSFORMATIONS AND PRESENTATION OF TOKAMAK KTM DATA

**M.V. Kolokoltsov, G.V. Shapovalov, A.G. Korovikov, M.V. Chudinova, P.V. Shipilov, D.A. Makarov, A.A. Kretinin, D.V. Shipilov**

*Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

A prototype of software system for the transformation and presentation of experimental data of physical diagnostics of tokamak KTM is described. The software is made on the basis of Java and Web technologies and is designed to analyze and manage data in the post-experimental period.

УДК 533.9.08;621.039.66

**ГЕНЕРАТОР ОТЧЕТОВ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ ТОКАМАКА КТМ****Чудинова М.В., Колокольцов М.В., Кретинин А.А., Макаров Д.А.***Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

Для устранения трудозатратных операций по послепусковой обработке экспериментальных данных токамака КТМ разработан специализированный генератор отчетов, учитывающий специфику задач и позволяющий формировать графическую информацию и генерировать на ее основе отчетную документацию.

**ВВЕДЕНИЕ**

Известно, что одной из самых трудозатратных операций, касающейся послепусковой обработки экспериментальных данных, является составление и оформление отчетной документации. В экспериментах на установке токамак КТМ предполагается проведение более десятка пусков (разрядов) в день, в ходе которых будет собираться значительное количество (4-8 Гб) данных. Одним из результатов анализа проводимых экспериментов на токамаке КТМ станет написание отчетов о достигнутых за разряды параметрах и полученных данных. В условиях больших объемов информации перед исследователями встает сложная задача ее документирования, очень часто представляющая собой длительную механическую работу по преобразованию информации, выполняемую большим количеством специалистов.

Таким образом, автоматизация документирования информации, направленная на оптимизацию использования времени исследователей, является весьма актуальной задачей.

Целью представляемой работы являлась разработка генератора отчетов (ГО) – КТМReporter, позволяющего минимизировать влияние человеческого фактора, формировать графическую информацию и генерировать на ее основе документацию.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ**

Для преобразования и представления экспериментальных данных токамака КТМ был разработан прототип специализированной системы программного обеспечения. В настоящий момент система используется для обработки данных, полученных при настройке и калибровке физических диагностик КТМ.

Работа с экспериментальными данными КТМ будет осуществляться в два этапа. Этап анализа информации в межразрядовой паузе ориентирован на экспресс оценку полученных параметров и принятие решений о дальнейших экспериментах. Второй этап проводится в послепусковое время и направлен на углубленный анализ информации. Также в послепусковой период происходит обмен данными и формируется отчетная документация. Одним из наиболее востребованных видов информации для написания отчетов в рамках системы преобразования и представления данных токамака КТМ являются ранее сформированные исследователями образы диаграмм – небольшие текстовые файлы, в которых

хранится список подлежащих визуализации данных и текущие настройки диаграммы. При формировании диаграмм для отчетного документа требуется совершить ряд действий, таких как поиск необходимого эксперимента в окне клиентского приложения, поиск образа в списке дерева сигналов, открытие образа в окне приложения, копирование и вставка изображения в документ. При создании отчетной документации, предполагается работать с достаточно большим объемом информации, в том числе и большим количеством диаграмм. При этом исследователям приходится совершать ряд однообразных манипуляций. Все вышеперечисленные действия требуют больших затрат времени и значительных усилий. Скорость выполнения работы при этом является важным критерием, от которой напрямую зависит время составления документации.

Длительность выполнения работы пользователя состоит из длительности восприятия исходной информации, длительности интеллектуальной работы (пользователь думает, что он должен сделать), длительности физических действий пользователя и длительности реакции системы. Как правило, длительность реакции системы является наименее значимым фактором [1].

Еще одним фактором, уменьшающим скорость выполнения работы – различные внешние раздражители, отвлекающие и сбивающие фокус внимания. Каждое такое отвлечение занимает определенное время.

Автоматизация процесса извлечения информации из базы данных, построения диаграмм и внесения их в отчетный документ позволила бы освободить пользователей от выполнения многих однообразных действий, отнимающих время, снижающих концентрацию внимания и отвлекающих от основной работы и повысить эффективность работы исследователей, что, в условиях больших объемов информации, является весьма актуальной задачей.

В рамках данной работы был разработан генератор отчетов КТМReporter, который предназначен для автоматической генерации диаграмм в различных приложениях, документации или шаблонов на основе этих диаграмм с минимально возможным количеством действий пользователя, поскольку в ходе процесса формирования документа время затрачивается преимущественно на машинные процессы.

Сформированный в результате отчет является вспомогательным документом для написания научного отчета исследователей. На языке информационных технологий такой отчет (сформированный генератором отчетов) представляет собой документ, который содержит необходимую для исследователя информацию, полученную из файлов или баз данных, и представленную в удобном для него виде.

#### КРАТКИЙ ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ГЕНЕРАТОРОВ ОТЧЕТОВ

В современном мире, когда компьютеры перерабатывают массу разнообразной информации, существует широкий выбор генераторов отчетов. ГО существуют как в виде самостоятельных программ, так и в виде генераторов отчетов, встроенных в СУБД или среды разработки. Они представляют собой программные инструменты для создания пользовательских отчетов и способны извлекать информацию из отдельных файлов или баз данных и создавать на основе этой информации отчеты различных видов. Некоторые мощные генераторы отчетов позволяют произвести над данными различные вычисления, например, вычислить итоговую сумму или среднее значение.

Перед разработчиками новых программ рано или поздно, но всегда неизбежно, встает проблема выбора генератора отчетов или необходимость создания собственного программного продукта. Выбор генератора зависит от многих аспектов: удобство дизайнера, поддержка экспорта в общеизвестные форматы документов, цена, личные предпочтения разработчиков и некоторых других.

Типичными представителями генераторов отчетов являются Crystal Report (от компании Crystal Decisions), который много лет входит в состав средств разработки от фирм Microsoft и Borland, Fast Report (от компании Fast Reports Inc) - хорошо известен в среде разработчиков, использующих Delphi. Еще один представитель - Report Sharp-Shooter (от компании Perpetuum Software) - исключительно гибкий генератор отчетов для платформы Microsoft .NET.

Crystal Reports позиционируется компанией как программа для трех категорий пользователей:

1. Специалисты в области экономики (менеджеры, аналитики, руководители разного уровня), которым необходимы отчеты для принятия решений.
2. IT – специалисты, которым необходимо встраивать отчеты в их собственные приложения.
3. Web–мастера, которым необходимо публиковать в Internet информацию из баз данных [2].

FastReport позиционируется компанией как программа для двух категорий пользователей:

1. Специалисты в области экономики (менеджеры, аналитики, руководители разного уровня), которым необходимы отчеты для принятия решений.

2. IT – специалисты, которым необходимо встраивать отчеты в их собственные приложения [3].

Report Sharp-Shooter позиционируется компанией как генератор отчетов для .NET, создающий любые отчеты для Windows- и Web-приложений.

Представленные генераторы отчетов имеют достаточно широкий набор функций. Открытая архитектура продуктов гарантирует легкость их интеграции в другие проекты, а также позволяет добавлять собственную функциональность.

На принятие решения о разработке собственного генератора отчетов повлияло то, что, учитывая специфику работы с экспериментальными данными токамака КТМ, существующие доступные системы построения отчетов не обладают нужными характеристиками, требуют написания дополнительных функций и являются платными. Генератор отчетов Report Sharp-Shooter имеет условно-бесплатную версию, однако он ориентирован для использования только на платформе Windows.

Собственная же разработка позволит создать кроссплатформенный продукт с использованием средств, наилучшим образом способствующих интеграции в систему преобразования и представления экспериментальных данных токамака КТМ; реализовать достаточную гибкость и функциональность; максимально учесть специфику задач при работе с экспериментальными данными.

#### СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДИАГНОСТИК В МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ НА ТОКАМАКЕ КТМ

Система преобразования и представления экспериментальных данных диагностик в материаловедческих исследованиях на токамаке КТМ ориентирована на решение задач послепусковой обработки данных. Система состоит из серверной базы данных, функционирующей под сервером баз данных, сервера приложений, управляющего доступом к данным, и клиентского программного обеспечения (рисунок 1). Сервер приложений предусмотрен для управления соединениями, централизации и оптимизации взаимодействия с данными, интеграции с существующими информационными системами токамаков в составе системы. В базе данных содержится обработанная информация, предварительно полученная из общей базы экспериментальных данных, входящей в состав информационно-измерительной системы (ИИС) КТМ. Структура базы данных позволяет хранить как зарегистрированные, так и обработанные сигналы, события, произошедшие за время разряда, описание аппаратных средств и свойств сигнала. Кроме того, в БД хранятся сформированные пользователем диаграммы. Использование образов дает пользователю возможность многократной работы с построенными им диаграммами, не храня при этом на своем компьютере «тяжелые» файлы данных.

Согласно данной модели, функции обеспечения доступа к данным для конечного пользователя передаются клиентскому приложению. С его помощью пользователь может (при наличии прав) работать со всеми имеющимися данными, как в общей базе данных, так и в подключенных к серверу приложений системах. Для экономии сетевого трафика в клиентское приложение включены функции буферизации запрошенной информации на клиентском компьютере. Для повышения степени автоматизации создания отчетов исследователями клиентское приложение интегрировано с офисными приложениями.

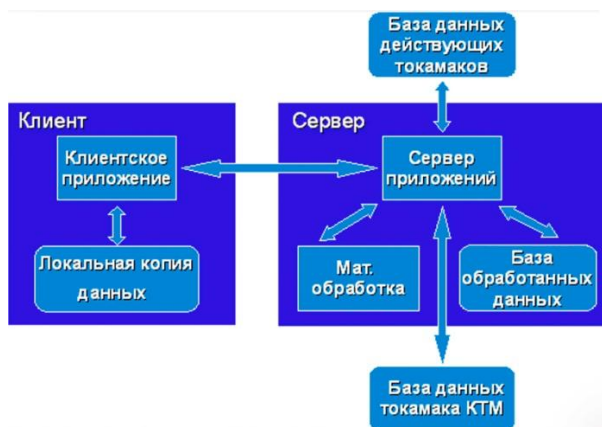


Рисунок 1. Схема архитектуры системы преобразования и представления экспериментальных данных диагностик

### ГЕНЕРАТОР ОТЧЕТОВ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ ТОКАМАКА КТМ – KTMREPORTER

KTMReporter интегрирован в систему преобразования и представления экспериментальных данных токамака КТМ и является серверным компонентом, связанным с сервером приложений. Такой подход позволяет обеспечить централизованное управление генерацией отчетов, а также, при необходимости, расширить функциональность ГО (рисунок 2).



Рисунок 2. Схема архитектуры генератора отчетов KTMReporter

KTMReporter, обрабатывающий запросы клиентов на генерацию отчетной документации, интегрирован с различными внешними приложениями (OpenOffice, Com-сервер), использует наиболее распространенный и универсальный формат отчетов (MS Word .doc), предоставляет пользователю возможность редактирования полученного конечного отчета.

В данный момент KTMReporter представляет следующую функциональность:

1. выборка данных из БД и файлов данных;
2. генерация изображений;
3. формирование шаблонов или документов на основе шаблонов, содержащих диаграммы.

В разработке были использованы следующие инструменты и технологии:

- Java – в настоящее время данный продукт является не только языком программирования, но и платформой для создания приложений уровня предприятия на основе данного языка; Java был использован для разработки серверных компонентов.
- OpenOffice – свободный пакет офисных приложений, работающий на платформах Microsoft Windows и UNIX-подобных платформах; обладает достаточной гибкостью, развитым SDK для Java, может работать с широким спектром текстовых документов, и, что немаловажно – бесплатен.
- Delphi – средство быстрой разработки ПО, эффективное при создании сложных и многофункциональных графических интерфейсов; версия из пакета BORLAND DEVELOPER STUDIO 2006 была использована для разработки собственного построителя графиков, выполненного в виде Com-сервера.

Для создания шаблонов документов на клиентском приложении разработан простой в использовании, интуитивно понятный графический интерфейс (рисунок 3).

В настоящее время KTMReporter поддерживает два способа генерации отчетов: на основе списка образцов создается шаблон – файл формата MS Word (doc формат) со встроенными диаграммами; или в существующий документ, представляющий собой шаблон, вносятся графические изображения (диаграммы) в указанные пользователем и промаркированные соответствующим образом места.

На выходе пользователь получает сгенерированный документ с графическими изображениями, с которым может продолжить работу.



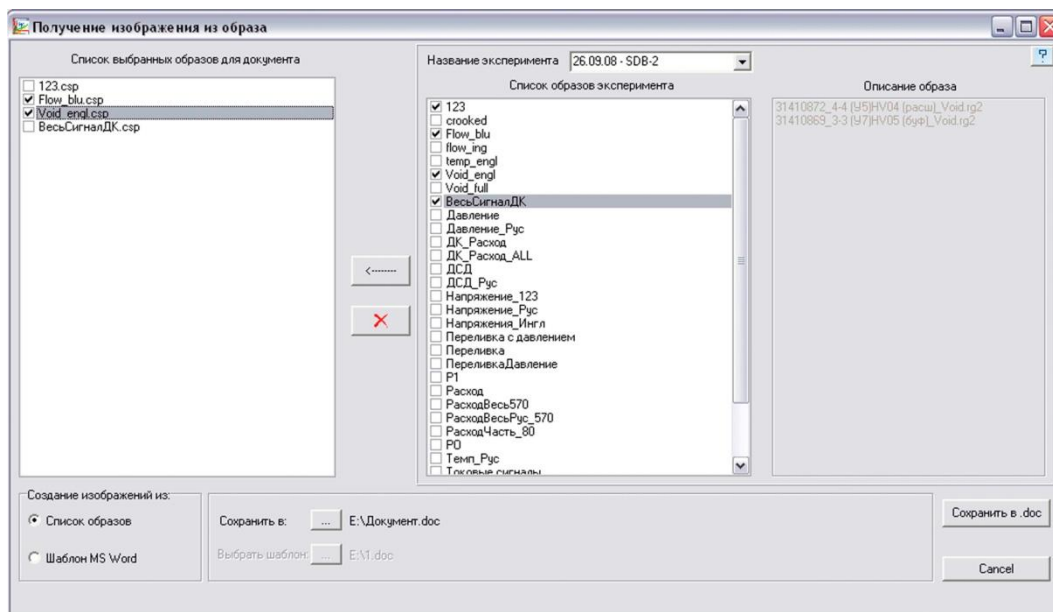


Рисунок 3. Окно управления генератором отчетов KTMReporter

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате разработки генератора отчетов по экспериментальным данным токамака КТМ, функционально дополняющего систему обработки и представления данных, получены следующие результаты:

1. Разработана идеология создания отчетной документации по экспериментальным данным токамака КТМ.
2. Получен алгоритм создания и передачи документа в структуре клиент-сервер-клиент.
3. Разработаны методы интеграции сервера приложений с дополнительными приложениями (OpenOffice, Com-сервер для построения изображений).
4. Разработан собственный построитель графиков, выполненный в виде Com-сервера, извлекающий информацию из файлов или базы данных и генерирующий графические изображения.
5. Разработан генератор отчетов KTMReporter.
6. Дополнено клиентское приложение для работы с KTMReporter.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Головач, В. В. Дизайн пользовательского интерфейса / В. В. Голович. – М. : Изд. дом "Питер", 2002. – 146 с.
2. Генератор отчетов Crystal Reports [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.firststeps.ru/sql/cryrep/r.php?2>.
3. Первые шаги в FastReport Studio [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.reportingfor.info/ru/page.php?7>.

## КТМ ТОКАМАГЫНЫҢ ЭКСПЕРИМЕНТАЛДЫ ДЕРЕКТЕРІ БОЙЫНША ЕСЕП ГЕНЕРАТОРЫ

Чудинова М.В., Колокольцов М.В., Кретинин А.А., Макаров Д.А.

ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан

КТМ токамагының эксперименталды деректердің пусқан кейінгі жөндеу бойынша көп шығынды операцияларды жою үшін, графикалық ақпаратты қалыптастыруды рұқсат ететін және оның негізінде есеп құжаттаманы генерациялау міндет спецификасын есепке алатын арнайы есеп генераторлары әзірленді.

**REPORT GENERATOR FROM EXPERIMENTAL DATA OF TOKAMAK KTM**

**M.V. Chudinova, M.V. Kolokoltsov, A.A. Kretinin, D.A. Makarov**

*Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

To resolve labor operations on post-start processing of experimental data of Tokamak KTM the specialized report generator tailored to the tasks and allowing to form graphic information and generate report documentation based on it, is developed.

УДК 53.08:621.59

**ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ВАКУУМНОГО СТЕНДА**

Ольховик Д.А., Шипилов П.В., Коровиков А.Г., Чихрай Е.В.

*Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

Разработана информационно – управляющая система, обладающая высокой скоростью опроса и большой точностью измерений, позволяющая исследовать изменения плотности плазмы в токамаке КТМ. Проведены экспериментальные исследования, целью которых является оценка соответствия метрологических характеристик измерительных каналов ИУС требованиям технического задания.

**ВВЕДЕНИЕ**

Информационно управляющая система (ИУС) вакуумного стенда предназначена для получения измерительной информации от первичных преобразователей КИПиА, размещенных на технологических системах вакуумного стенда, ее преобразование, обработку, с целью предоставления потребителю в требуемом виде, а так же автоматическое осуществление функций логического контроля технологических параметров систем стенда.

**ОБЪЕКТ АВТОМАТИЗАЦИИ**

Целью работы на вакуумном стенде является отработка газодинамического метода изменения плотности плазмы в токамаке КТМ для обеспечения подпитки и гашения плазмы и исследование эффективности этого метода на экспериментальном газодинамическом стенде. Для практической реализации этого метода разработано устройство (система) на основе источника сверхзвукового молекулярного пучка, которое первоначально будет испытано на специально созданном вакуумном стенде. В ходе испытаний предполагается отработать импульсный метод подачи сверхзвукового молекулярного пучка. В дальнейшем эту систему планируется эксплуатировать в составе токамака КТМ. Сверхзвуковой молекулярный пучок может также использоваться для диагностики плазмы. Работы по исследованию системы подпитки и гашения плазмы являются составной частью работ, по отработке стендовых систем будущего материаловедческого токамака.

В состав вакуумного стенда входят следующие основные системы и оборудование:

- источник сверхзвукового молекулярного пучка;
- вакуумная камера;
- система откачки вакуумной камеры и источника молекулярного пучка;
- система подачи рабочих газов;
- средства измерения параметров вакуума и сверхзвукового молекулярного пучка;
- тестовая камера, для отработки методов измерения параметров сверхзвукового молекулярного пучка.



Рисунок 1. Агрегатный шкаф системы подачи инертных газов



Рисунок 2. Вакуумная камера стенда

**СТРУКТУРА И ФУНКЦИИ КОМПЛЕКСА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ**

Структурное и функциональное построение распределенных информационно-управляющих систем, как правило, основывается на использовании принципа иерархии, суть которого заключается в делении структуры системы на уровни, подчиненные один другому. Такое построение имеет ряд преимуществ, одним из которых является формализация структурно-функционального содержания уровней

системы при сохранении взаимосвязей между ними. Структура ИУС вакуумного стенда представленная на рисунке 3 содержит 2 уровня иерархии.

Нижним уровнем системы являются средства измерения технологических параметров, запорная и регулирующая арматура. Оборудование нижнего уровня обеспечивает передачу информации на верхний уровень.

Средства измерения и управления нижнего уровня приведены в таблице 1.

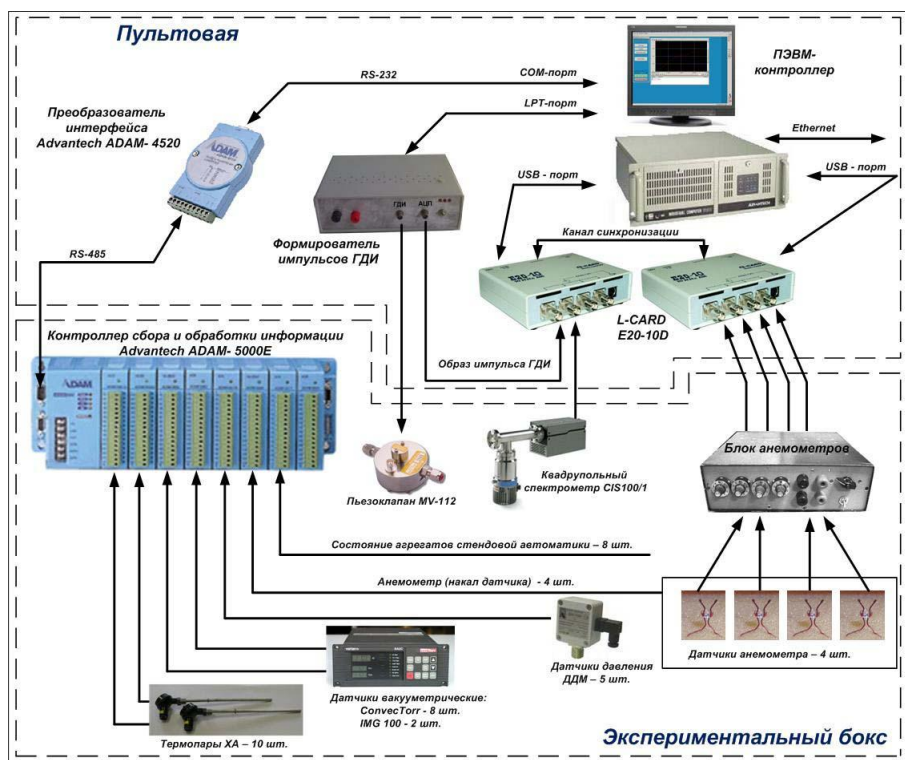


Рисунок 3. Структура ИУС вакуумного стенда

Таблица 1. Средства измерения и управления нижнего уровня

№	Измеряемый параметр	Тип первичного преобразователя	Предел измерения	Выходной сигнал	Частота регистрации, Гц	Кол-во
<i>Каналы измерения</i>						
1	Давление	Датчик давления ДДМ	0-0,5 МПа	4-20 мА	10	5
2	Давление	Датчик давления JS D 50 C C	10-300 кПа	4-20 мА	10	1
3	Разрежение	Датчик вакууметрический Convectorr	$10^{-1}-10^5$ Па	0-10 В	10	8
4	Разрежение	Датчик вакууметрический IMG 100	$10^{-6}-10^0$ Па	0-10 В	10	2
5	Температура	Термопара ХА	223-323 К	0-50 мВ	10	10
6	Напряжение	Анемометр	0-5 В	0-5 В	$10^6$	4
7	Напряжение	Анемометр (накал датчика)	0-5 В	0-5 В	10	4
8	Напряжение	Квадрупольный спектрометр CIS100/1	0-5 В	0-5 В	$10^6$	1
9	Напряжение	Датчик открытия клапана MV-112 (образ импульса запуска ГДИ)	0-5 В	0-5 В	$10^6$	1
10	Состояние АСА	Сухой контакт	Вкл/Выкл	0/24В	10	8
<i>Каналы управления</i>						
1	Амплитуда и длительность открытия клапана MV-112	Сигналы управления платой специзмерений		Дискрет	10	8

В состав верхнего уровня входят микропроцессорные устройства – контроллер сбора и обработки информации модули аналогового и дискретного ввода, модули быстродействующего аналого-цифрового преобразования, преобразователь интерфейса, источник питания, формирователь импульса ГДИ и др., которые предназначены для автоматического сбора и первичной обработки информации измеряемых и управляемых параметров.

ПЭВМ-контроллер осуществляет обработку, архивацию и отображение информации, а также обеспечивает средства диалога с оператором системы.

**ПРИКЛАДНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ**

Для разработки программного обеспечения в ИУС используется SCADA-система TRACE MODE 6.

В SCADA системе TRACE MODE 6 является уникальная технология автопостроения. Она позволяет создать связи между узлами распределенной системы управления (PCY), между источниками данных SCADA и каналами, создать источники данных по известной конфигурации контроллера и т.п.

Монитор реального времени производит опрос технологических каналов и обработку полученной информации, а также производит управление формирователем ГДИ и подачей сигнала импульса.

После запуска монитора реального времени экран дисплея выводится главное окно, представленное на рисунке 4. Это окно является главным и из него осуществляются переходы по остальным рабочим экранам программы.

Таблица каналов является основным инструментом просмотра полученной информации и основных настроек канала в текстовом режиме, а так же

управляет отображением информации на графическом тренде.

Графический тренд, это форма представления данных в виде графических кривых со шкалой заданных диапазонов значений и шкалой временных интервалов, рисунок 5.

По умолчанию при открытии окна информация не выводится на графический тренд для вывода информации на тренд необходимо использовать маркеры таблицы значений. Двойной щелчок на маркере включает режим отображения по данному каналу, повторное двойное нажатие на том же маркере отключает этот режим.

Для задания амплитуды и длительности импульса используется экран «Настройки ГДИ» рисунок 6.

Программа управляет амплитудой и длительностью импульса запуска ГДИ в требуемых пределах, может линейно наращивать/уменьшать амплитуду импульса на один шаг (в режиме тестирования) с указанным интервалом времени, указывает текущее состояние установок амплитуды и длительности, может обнулять их, производит одиночный и периодический (для осциллографирования, при отключенном ГДИ) запуск импульса.

Программа работает при соединении стандартным кабелем LPT порта компьютера с разъемом блока формирователя импульса ГДИ и включенном блоке.

После завершения установки требуемых значений амплитуды и длительности импульса запуска ГДИ можно подать команду на его запуск нажатием кнопки «ИМУЛЬС». При этом на выходе блока формирователя будет сформирован рабочий сигнал включения клапана ГДИ с нужной амплитудой и длительностью.

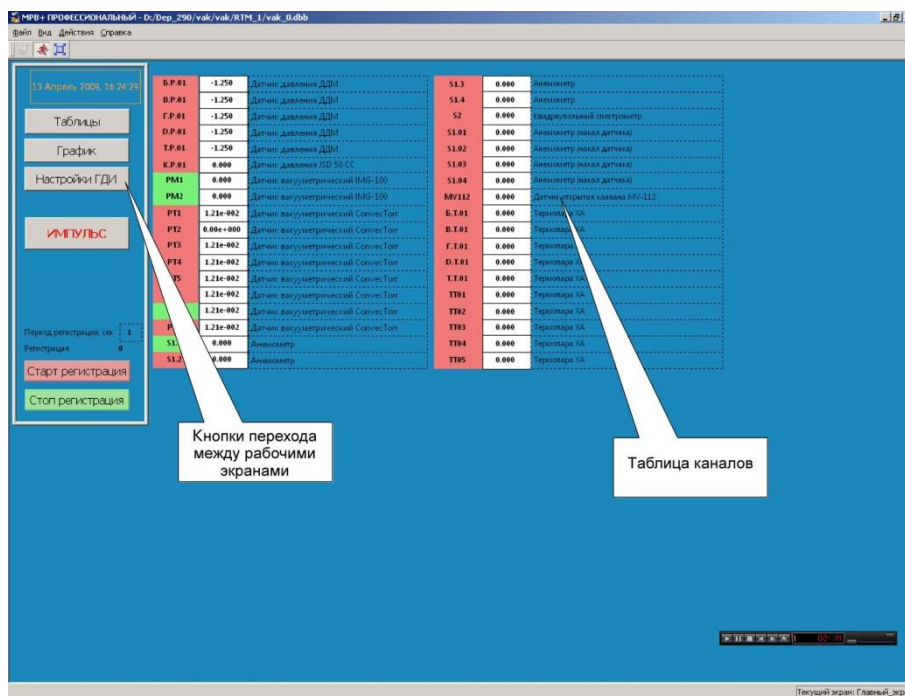


Рисунок 4. Окно монитора реального времени



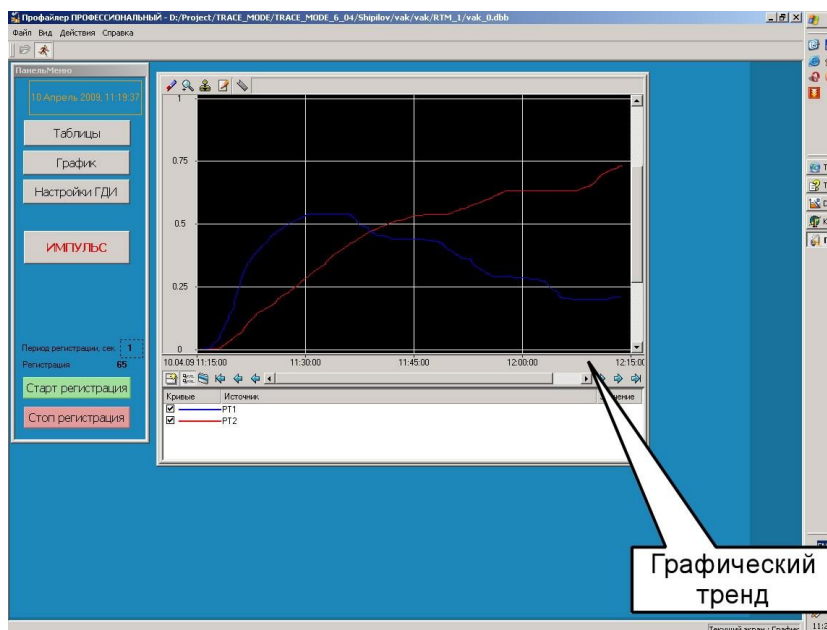


Рисунок 5. Рабочий экран «График»

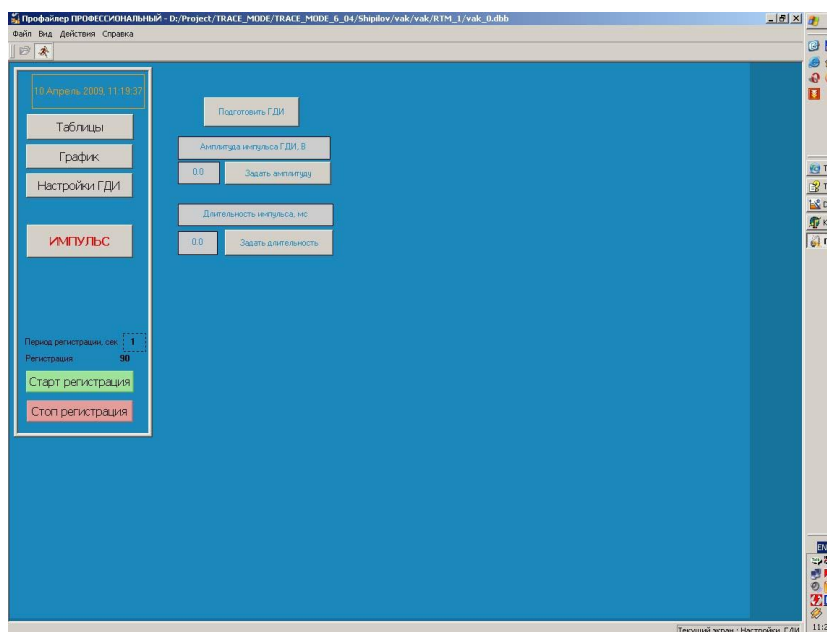


Рисунок 6. Рабочий экран «Настройка ГДИ»

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы была создана информационно - управляющая система, обладающая высокой скоростью опроса и большой точностью измерений, позволяющая исследовать изменения плотности плазмы в токамаке КТМ.

Проведены экспериментальные исследования, целью которых является оценка соответствия метрологических характеристик измерительных каналов ИУС требованиям технического задания.

В результате опытной эксплуатации было выявлено, что разработанная система обладает следующими преимуществами:

- скорость опроса и регистрации;
- за счет правильного подбора оборудования обеспечена высокая точность измерений;
- максимально упрощенная процедура настройки каналов;
- система обладает высокой гибкостью для установки различных типов датчиков;
- разработан модуль управления запуска ГДИ;
- разработан модуль быстрой регистрации.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. ГОСТ 7.32-2001. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.
2. ГОСТ 2.105 ЕСКД. Общие требования к текстовым документам.
3. Спектр, С. А. Электрические измерения физических величин. Методы измерений / С. А. Спектр. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.
4. Руководство пользователя TRACE MODE/AdAstra Research Group, Ltd, 2000.

**ВАКУУМДЫ СТЕНДТТИҢ АҚПАРАТТЫ-БАСҚАРМА ЖҮЙЕСІ**

**Ольховик Д.А., Шипилов П.В., Коровиков А.Г., Чихрай Е.В.**

*ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан*

КТМ токамагында плазма тығыздығын өзгеруін зерттеуге ерік беретін, өлшемнің үлкен дәлдігімен және сұраудың үлкен жылдамдығымен ие болған ақпаратты-басқарма жүйесі әзірленді. АБЖ өлшем каналдарының техникалық тапсырма талаптарына, метрологиялық сипаттамаларының сәйкестік бағасы мақсат болған эксперименталды зерттеулер жүргізілді.

**MANAGEMENT INFORMATION SYSTEM OF VACUUM STAND**

**D.A. Olkhovik, P.V. Shipilov, A.G. Korovikov, E.V. Chihray**

*Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

An information and control system, with its high speed and great interview and completely accurate measurements make it possible to study changes in the density of plasma in a tokamak KTM is developed. Experimental research aimed at assessment of metrological characteristics of measuring channels MIS corresponding to technical task requirements.



УДК 621.039.53

## ГАЗООХЛАЖДАЕМЫЙ РЕАКТОР С ВЫСОКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

Котов В.М., Иркимбеков Р.А., Витюк Г.А.

*Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

Показана возможность достижения КПД до 50 % в газоохлаждаемом реакторе с умеренными температурами теплоносителя и защитной оболочки твэлов. Реактор – канального типа с водяным замедлителем. Приведены теплогидравлические характеристики тракта теплоносителя, характеристики кампании реактора мощностью 40 МВт.

### ВВЕДЕНИЕ

В Институте атомной энергии РГП НЯЦ РК в рамках НТП "Развитие атомной энергетики в Казахстане" проводятся исследования возможности создания теплового реактора способного максимально полно использовать имеющиеся природные ресурсы ядерного топлива [1, 2]. Одной из составляющих, определяющих полноту использования, является коэффициент полезного действия машинных агрегатов, сопрягаемых с реактором. В этом отношении хорошие перспективы у одноконтурных газоохлаждаемых реакторов. В газотурбинных агрегатах имеются значительные потери энергии в ходе обмена энергией между газовым потоком и лопатками и достижение приемлемого КПД становится возможным при максимальной температуре цикла не менее 850°C.

В поршневых агрегатах значение КПД до 50 % можно получить, если максимальная температура цикла близка к 500°C [3, 4]. В этом случае резко упрощаются условия работы греющих элементов ядерного реактора, работающего в паре с поршневой машиной, и по оценкам, становится возможным использовать технические решения отработанные в многолетней практике таких реакторов, как ВВЭР.

Целью настоящей работы является проверка возможности создания газоохлаждаемого реактора с характеристиками нагружения тепловыделяющих элементов и сопряженных с ними конструкций в условиях их работы на поршневую машину. Особенностью настоящей работы является выбор в качестве замедлителя воды, что обеспечивает преимущество с предыдущими работами по созданию тепловых реакторов с высоким воспроизводством делящихся веществ. Исследования подтвердили правомерность такого выбора.

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРШНЕВОЙ МАШИНЫ И ГАЗОВОГО ТРАКТА РЕАКТОРА

Наиболее рекламируемые поршневые двигатели Стирлинга практически не могут составить конкуренцию газотурбинным агрегатам из-за ряда недостатков [5]. В настоящем проекте используется поршневой двигатель, работающий с использованием хорошо реализуемых на практике адиабатических (А) и изобарических (Р) процессов. Среди различных вариантов цикла такого двигателя был выбран цикл с дискретным приближением АР процессов к изотермическому (Т2) в области высоких и низких тем-

ператур и вставками из адиабатических и изобарических процессов между ними (Т2АРТ2АР). Этот цикл представлен на рисунке 1. Были выбраны следующие характеристики цикла: рабочее тело – гелий; максимальная температура цикла – 500°C; давление гелия в каналах типа I – 6,0 МПа; давление гелия в каналах типа II – 4,2 МПа; температура гелия на входе реактора – 350-380°C; КПД цикла без учета потерь – 53 %. Для выполнения условия работы твэлов приняты следующие характеристики: материал топлива – диоксид урана; материал оболочки – сплав циркония и ниобия; максимальная температура топлива – 2200 К; максимальная температура оболочки твэла – 1100 К.

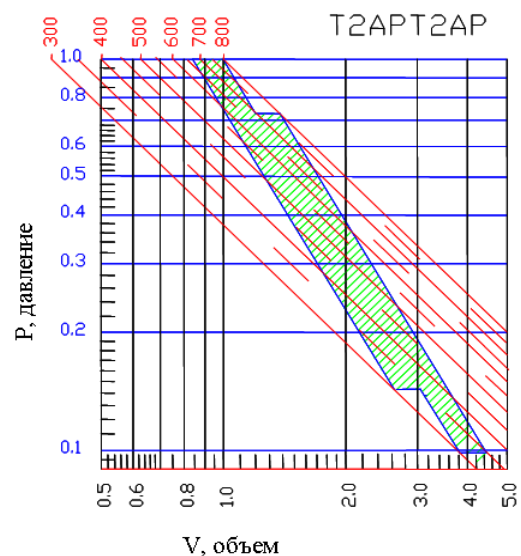


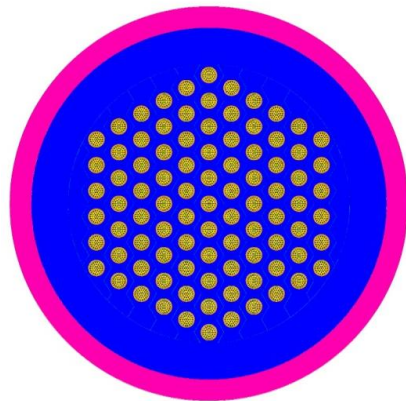
Рисунок 1. Цикл T2ART2AP поршневой машины

### ВЫБОР ХАРАКТЕРИСТИК ДЕМОНСТРАЦИОННОГО РЕАКТОРА

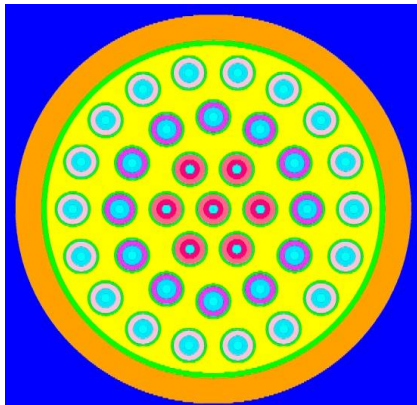
Наиболее высокие качества предлагаемого реактора с высоким КПД могут быть достигнуты с использованием решений, обеспечивающих высокое воспроизводство делящихся веществ. Такой реактор будет иметь достаточно большие габариты (диаметр и высота активной зоны свыше трех метров) и мощность (сотни мегаватт). Можно разделить достигаемые характеристики и выделить для демонстрационного реактора в качестве главной цели – высокий КПД сопряженного с ним поршневого двигателя

при малых температурах рабочего тела в сравнении с реакторами ВТГР.

С таким подходом можно априори построить реактор с меньшими размерами, меньшей стоимости. Была выбрана мощность демонстрационного реактора 40 МВт. Такой реактор будет иметь диаметр и высоту активной зоны близкие к одному метру. Была принята конструкция ТВС реактора в которой установлены 19 твэлов, расположение которых представлено на рисунке 2а. Выбранная конструкция обеспечивает сравнительно малый внутренний блок-эффект в варианте с газовым теплоносителем. При высоте ТВС около 1 м мощность одной ТВС может быть оценена в 400 – 500 кВт. Таким образом, в реактор необходимо установить около 80 – 100 ТВС. Рассматривались варианты использования твэлов типа ВВЭР-1000 и БН-350, отличающиеся внешним диаметром защитной оболочки. Соответственные внешние диаметры ТВС составляют 9,1 и 6,9 мм.



а – схема активной зоны



б – канал реактора

Рисунок 2. Активная зона водяного канального реактора с газовым теплоносителем и размещение твэлов в канале реактора

Равномерное по азимуту нейтронное поле в радиальном сечении ТВС может быть получено с использованием замедлителя имеющего длину пробега нейтронов близкую к диаметру ТВС. Обычная вода таким условиям не удовлетворяет. Кроме того, при оптимальном соотношении масс замедлителя и топ-

лива между стенками соседних ТВС будет расстояние не достаточное для создания элементов перегрузки топлива и сопряжения тракта теплоносителя в топливном канале с внешними магистралями этого тракта. Было принято решение о применении в качестве замедлителя смеси обычной и тяжелой воды. В первых вариантах в соотношении один к одному по массе. Такая смесь по стоимости не сильно отличается от графита, но имеет многократно большие преимущества в монтаже, эксплуатации реактора и в период снятия его с эксплуатации.

Вариант реактора с 91 топливным каналом представлен на рисунке 2б. Каналы с твэлами типа БН-350 установлены в треугольной решетке с шагом 114 мм. Внешний диаметр корпуса канала 76 мм.

#### РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА

Проведены расчеты нейтронно-физических и теплофизических характеристик активной зоны реактора, характеристики его кампании.

Первым вариантом топлива реактора выбран диоксид урана с обогащением 5 % по урану  $^{235}\text{U}$ . Давление выбрано близкое к половине максимального давления теплоносителя замедлителя (3 МПа), рабочая температура замедлителя установлена ниже температуры его кипения и равна 500 К. При этом коэффициент размножения реактора равен 1,25. Органы управления реактора могут быть размещены между топливными каналами. Применение смеси тяжелой и обычной воды обеспечивает достаточное пространство для такого размещения.

Величина шага решетки 114 мм была выбрана для данных условий оптимальной исходя из того, что именно в наборе данных параметров обеспечивается наибольшая реактивность реактора. Тем самым обеспечиваются предпосылки естественной защищенности реактора.

Длительность кампании реактора составляет 500 эффективных суток, а выгорание топлива в кампании достигает 20 МВт-сут/кг при выполнении одной перезагрузки топлива в реакторе. Если в кампании проводить три частичных перезагрузки топлива реактора, то можно добиться большей длительности кампании и большего выгорания топлива. В данной работе такая модель загрузки топлива детально не рассматривалась. Для сравнения, реактор РБМК-1000 имеет выгорание топлива 18 МВт-сут/кг, реактор CANDU – менее 10 МВт-сут/кг. Таким образом, рассматриваемый вариант реактора имеет хорошие показатели среди энергетических реакторов.

Тепловые характеристики наиболее нагруженного канала показаны в таблице 1. Температуры всех элементов ТВС приемлемы для работы реактора и имеется значительный запас до перегрева материалов ТВС. Коэффициент полезного действия ядерного реактора работающего на поршневую машину в рассматриваемом варианте цикла Т2АРТ2АР с учетом потерь энергии на прокачку составляет не менее 48 %.

**ГАЗООХЛАЖДАЕМЫЙ РЕАКТОР С ВЫСОКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ**

Таблица 1. Результаты теплового расчета канала

<b>Гелий</b>	
Температура в ТВС на входе/выходе, К	623 / 775
Перепад давления по высоте ТВС, атм	0,9
Скорость теплоносителя в ТВС на входе/выходе, м/с	96 / 120
<b>Наиболее горячий твэл в ТВС</b>	
Максимальная температура в центре сердечника твэла, К	1724
Максимальная температура на внешней поверхности сердечника, К	1537
Максимальная температура гелия в зазоре, К	1055
Максимальная температура оболочки твэла, К	900
<b>Другие элементы конструкции</b>	
Максимальная температура стенки канала ТВС, К	782
Максимальная мощность на прокачку теплоносителя, % от электрической мощности канала	4,9

**СРАВНЕНИЕ С ДРУГИМИ РЕАКТОРАМИ**

В таблице 2 представлены основные характеристики некоторых газоохлаждаемых реакторов. Реакторы отличаются как технологией их основных элементов, так и временем разработки. Интересно отметить, что уже в ранних разработках были достигнуты температуры теплоносителя, достаточные для получения высокого коэффициента полезного действия с применением поршневой машины на основе адиабатических и изобарических процессов. Этот факт является дополнительным подтверждением работоспособности конструкции предлагаемого реак-

тора, основанием для дальнейшего проведения работ в выбранном направлении.

Сравнение характеристик представленных реакторов выделяет предлагаемый реактор как лидер по коэффициенту полезного действия, как перспективный реактор с малыми затратами на создание топлива и обслуживание замедлителя. Тепловая энергия, выделяемая в замедлителе, может использоваться как источник для обеспечения различных технологических потребностей АЭС и внешних потребителей за счет высокого уровня температуры замедлителя, что повышает общую отдачу реактора.

Таблица 2. Сравнительные характеристики водяного реактора с газовым теплоносителем с другими типами газоохлаждаемых реакторов

Параметр	HTGR Reach Bottom	AGR	HTGR-1160	THTR-300	КНТР	Расчетный реактор
<b>Реактор</b>						
Тепловая мощность, МВт	115	1493	3000	750	50	40
Электрическая мощность (брутто), МВт	40	625	1175	310	15	20
КПД	35	42	39	41	30	50
<b>Первый контур</b>						
Теплоноситель	гелий	CO <sub>2</sub>	гелий	гелий	гелий	гелий
Давление, МПа	2,4	4,3	5,1	4,0	4	5
Температура теплоносителя на входе/выходе, °С	344/728	292/645	316/741	260/750	560/900	350/500
<b>Активная зона</b>						
Диаметр, м	2,8	9,1	8,4	5,6	3,0	1,18
Высота, м	2,3	8,3	6,3	5,1	2,9	1,3
Энергонапряженность, МВт/м <sup>3</sup>	-	2,76	8,6	6,0	5,7	28
Энергонапряженность топлива, кВт/кг	-	13,1	76,5	115	33,8	36,2
Топливо	-	UO <sub>2</sub> (обогащенный 2,0-2,55 %)	Th- <sup>235</sup> U (обогащение 93 %)	Th- <sup>235</sup> U (обогащение 93 %)	U обогащение макс. 9,9 %, мин. 3,0 %, среднее 5,3 %	UO <sub>2</sub> (обогащение 5 %)
Загрузка топлива, т		114U	1,725U +37,5Th	0,33U +6,22Th	1,48	1,11
Тип твэла		стержневой	стержневой в графитовых призмах	шаровой	стержневые твэлы, встроенные в графитовый блок с отверстиями для теплоносителя	стержневой

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена возможность использования в качестве нагрузки ядерного реактора поршневой машины, работающей на основе адиабатических и изобарических процессов, и обеспечивающей возможность достижения большего коэффициента полезного действия, чем турбомашины или двигатель Стирлинга. Особенностью такого комплекса является использование температурного режима топлива хорошо отработанного в энергетических реакторах на твэлах с оксидным топливом.

Проработан вариант газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем тепловой мощностью 40 МВт. В состав замедлителя включены обычная и тяжелая вода, что обеспечивает простоту конструкции реактора и уменьшает затраты на утилизацию его элементов в сравнении с графитовым замедлителем.

Принятые технические решения по конструкции активной зоны совместимы с разрабатываемой в ИАЭ НЯЦ РК технологией высокого воспроизводства делящихся веществ. Конструкция твэлов, давление теплоносителя в каналах соответствуют этой технологии.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Котов, В. М. Ядерный реактор на тепловых нейтронах / В. М. Котов. – Предварительный патент Республики Казахстан № 14841 от 30.06.2004.
2. Котов, В. М. Воспроизводство делящихся веществ в тепловых реакторах / В. М. Котов, С. В. Котов // Атомная энергия. – 2007. – Т. 103, вып. 5. – С. 327-329.
3. Котов, В. М. Поршневой двигатель с замкнутым рабочим циклом. / В. М. Котов, Л. Н. Тихомиров. – Предварительный патент Республики Казахстан № 14124 от 07.01.2004.
4. Котов, В. М. Способ работы тепловой машины и поршневой двигатель для его осуществления / В. М. Котов – Патент РФ № 2284420 от 27.09.2006.
5. Возможности поршневых двигателей с изобарическими и адиабатическими процессами. В. М. Котов [и др.]// Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве : докл. Междунар. конф., Москва, 13-14 мая 2008. – С. 74–78.

## ПАЙДАЛЫ ӘРЕКЕТТІҢ ЖОҒАРЫ КОЭФФИЦИЕНТІМЕН ГАЗБЕН САЛҚЫНДАТАТЫН РЕАКТОР

**Котов В.М., Иркимбеков Р.А., Витюк Г.А.**

*ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан*

Твэлдердің қорғау қабықшасының және жылу тасымалдаушының біркелкі температураларымен газбен салқындататын реакторда 50 % дейін ПЭК жету мүмкіндігі көрсетілген. Реактор – канал типті су бәсендеушісімен. Реактордың 40 МВт қуатымен кампания сипаттамалары және жылу тасымалдағыш трактының жылу гидравликалық сипаттамалары келтірілді.

## GAS-COOLED REACTOR WITH HIGH COEFFICIENT OF EFFICIENCY

**V.M. Kotov, R.A. Irkimbekov, G.A. Vityuk**

*Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

The possibility to achieve efficiency up to 50% in gas-cooled reactor with moderate temperatures of coolant and protective casing of fuel elements is shown. The reactor – is the channel-type and water-moderated. Thermohydraulic characteristics of the coolant path and the characteristics of the reactor campaign with power of 40 MW are given.

УДК 539.104

**МАКЕТ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ****Акылбек Н.М., Ахметов К.М., Алдияров Н.У., Бекен Р.Е.***Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан*

В работе представлены результаты по разработке макета ионно-плазменного источника непрерывного действия. Анализ полученных данных показал, что разработанный ионно-плазменный источник не уступает по своим основным техническим параметрам другим известными сильноточными ионными источниками. Одним из возможных направлений применения может служить технология получения и обработки поверхностных нанослоев.

**ВВЕДЕНИЕ**

Ионные источники – устройства для получения направленных потоков ионов. Ионные источники применяются в ускорителях, масс-спектрометрах, ионных микроскопах, установках разделения изотопов, ионных ракетных двигателях. В настоящее время одним из быстро расширяющейся областью применений источников ионов в современной технологии является оборудование ионно-лучевой обработки материалов (операции финишной очистки поверхности ИС, имплантации, распыление металлических и диэлектрических материалов, травление микроструктур и т.д.)

Научная значимость работы связана с фундаментальной проблемой моделирования ионно-плазменных процессов, в частности, изучением процессов возникновения и поддержания плазменного состояния вещества в высоком вакууме. Известно, что ионно-плазменные источники все шире используются в науке и технике:

- 1) в ускорителях заряженных частиц, предназначенных для исследований в области ядерной физики и создания наноструктурных материалов;
- 2) в инжекторах заряженных частиц, служащих для заполнения магнитных ловушек быстрыми ионами;
- 3) для создания реактивной тяги в космонавтике;
- 4) в установках для электромагнитного разделения изотопов;
- 5) для различного рода научных исследований, по взаимодействию ионных пучков с плазмой или с поверхностью твердого тела, в области высокотемпературной химии, микроанализа поверхности твердого тела;
- 6) в нанотехнологии для получения и диагностики образцов,
- 7) в различных технологических процессах, таких как размерная обработка твердых тел, легирование полупроводников, пассивирование поверхности металлов, образование металлических пленок на поверхности твердого тела или удаление пленок с этой поверхности и т.д.

Создание универсального сильноточного ионно-плазменного источника нового типа может найти широкое применение в этих отраслях науки и техники, создавая качественный сдвиг в них [1].

**ОБЗОР ИЗВЕСТНЫХ ТИПОВ СИЛЬНОТОЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ**

В настоящее время разработано и эксплуатируется большое число источников различных типов. Одним из распространенных типов источников является пеннинговский ионный источник [2], содержащее катод, антикатод в виде двух параллельных дисков, анодную пластину с отверстием посередине и расположенную между катодами. Конструкция находится в магнитном поле, силовые линии которого параллельны ее оси. Поступающие в устройство атомы или молекулы газа, при установлении соответствующих значений электрических потенциалов на его элементы и величины напряженности магнитного поля, ионизируются осциллирующими электронами – возникает плазма. Ионы плазмы затем выводятся из устройства электродной системой вывода пучка через отверстие в одном из катодов. Недостатком этого источника является высокий разброс энергий ионов вследствие возникновения колебания широкого спектра частот из-за сложного характера движения заряженных частиц в разряде.

Другим распространенным типом источника – дуоплазматрон [3], содержащее прогреваемый катод, анод, промежуточный электрод из ферромагнетика и ускоряющий электрод, служащий в качестве электрода формирования и вывода ионного пучка. Нейтральные атомы или молекулы здесь поступают в узкую область между промежуточным электродом и анодом, где ионизируются под действием ускоренного и фокусированного электронного пучка, сформированного в другой части устройства, состоящего из накаливаемого катода и промежуточного электрода. В результате возникает плазма довольно высокой плотности и ионный пучок выводится из нее ускоряющим электродом. Недостатком устройства является сложность конструкции, что приводит к высоким требованиям в изготовлении и эксплуатации. Например, применение ферромагнитного материала для создания стабильного и определенного распределения напряженности поля требует необходимости охлаждения устройства при эксплуатации. Следует отметить также, что в данном устройстве, как и в вышеуказанном, количество атомов необходимых для образования и поддержания плазмы довольно большое – давление в источнике составляет порядка  $10^{-2}$  мм.рт.ст.

Следует отметить наиболее близким по технической сущности к данной разработке является ионный источник [4], содержащий накальный катод, цилиндрический анод, вытягивающий электрод в виде сетки, и постоянный магнит с магнитопроводом. Рабочий газ, попадая в разрядную камеру, образованную из анода и катода, после подачи напряжения между анодом и разогретым катодом, ионизируется и формирует пучок в промежутке между разрядной камерой, имеющей положительный потенциал, и сеткой, находящейся под потенциалом земли. Разряд происходит в продольном поле постоянного магнита, который поддерживает образовавшуюся плазму. Несмотря на довольно высокие рабочие характеристики (давление на выходе источника порядка  $10^{-4} - 10^{-5}$  мм.рт.ст. при средней плотности ионного тока  $1,5 \text{ mA/cm}^2$ ).

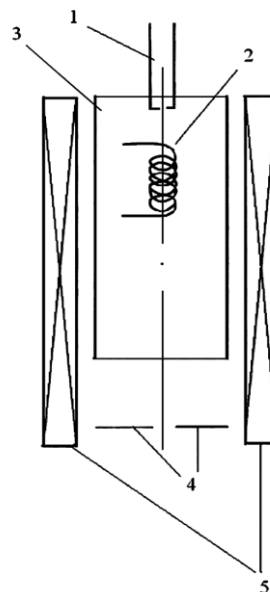
### МАКЕТ ИОННОГО ИСТОЧНИКА И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Авторами предлагается универсальный ионный источник с высокой плотностью пучка и с широким диапазоном действия для различных атомов и молекул. Технический результат предложенному источнику с накальным катодом, включающий входное окно, накальный катод, цилиндрический анод, электрод вывода ионного пучка и магнитный элемент, достигается тем, что в качестве источника электронов использован подогреваемый электрическим током накальный катод, установленный перед входным окном, в виде соленоида, ось которого совпадает с осью всего устройства, и осесимметрическая магнитная катушка. Оси перечисленных элементов совпадают между собой и образуют общую ось этого источника.

На рисунке 1 представлена конструкция устройства ионно-плазменного источника с накальным катодом.

Устройство работает следующим образом. Рабочий газ (атомы или молекулы) попадает через входное окно 1, расположенное на оси устройства, в разрядную камеру, где ионизируется ускоренными электронами эмиссии термокатода 2, двигающимися по сложной траектории в комбинированном электростатическом и магнитном полях, образуя плазменный шнур в пространстве внутри анода 3. Плазменный шнур совпадает с осью электромагнита 5. Образовавшие в камере ионы стремятся электродом вывода пучка 4, который находится под потенциалом Земли.

На макете ионного источника [5] была проведена работа по изучению его экспериментальных параметров при различных условиях применения. На рисунке 2 представлен результат измерений зависимости от величины магнитного поля создаваемого катушкой электромагнита. По оси абсцисс приведена величина тока катушки.



1-входное окно, 2- накальный катод, 3- цилиндрический анод, 4- электрод вывода пучка, 5- магнитные катушки

Рисунок 1. Схема ионно-плазменного источника с накальным катодом

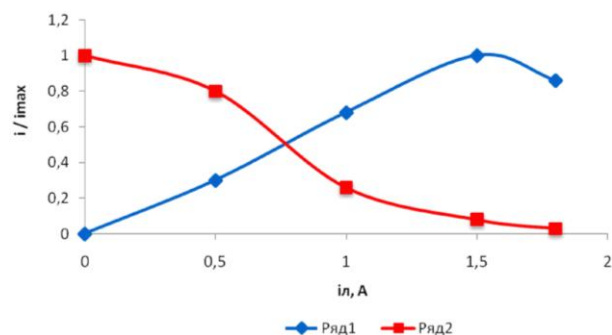


Рисунок 2. Зависимость поведения тока коллектора (Ряд1) и тока анода (Ряд2) от величины тока магнитной линзы

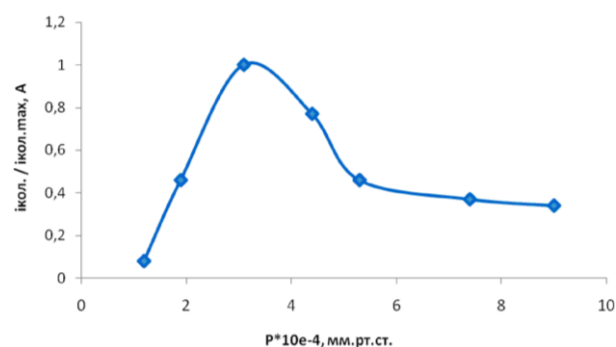


Рисунок 3. Зависимость поведения тока коллектора от количества входящего газа

На рисунке 3 приведена зависимость потока ионов от натекания газа в разрядную камеру через входное окно.

На рисунке 4 представлена зависимость потока ионов от приложенного напряжения анода в разных режимах натекания газа в объем камеры источника.



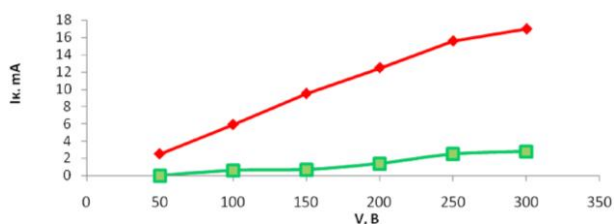


Рисунок 4. Изменение тока коллектора от напряжения на аноде источника при различных режимах натекания газа (Ряд1 –  $1,5 \cdot 10^{-4}$  мм.рт.ст.; Ряд2 –  $1,5 \cdot 10^{-5}$  мм.рт.ст.)

Следует отметить, что диаметр пучка ионов не превышает 10 мм. Таким образом, регулируя величину и направления тока в катод, напряжения между электродами и напряженности магнитного поля, можно получить довольно высокие плотности потока ионов с помощью данного источника.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование основных рабочих характеристик показало, что настоящий источник по своим техническим параметрам не уступает известным сильноточным ионным источникам и имеет ряд существенных преимуществ:

- низкое напряжение разряда, благодаря чему ионный пучок содержит небольшое количество

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Габович, М. Д. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей / М. Д. Габович, Н. В. Плешивцев, Н. Н. Семашко. - М.: Энергоатомиздат. 1986. – 248 с.
2. Форрестер, А. Т. Интенсивные ионные пучки / пер. с англ. Под ред. Н. Н. Семашко. - М.: Мир, 1992. - 203-208 с.
3. Габович, М. Д. Физика и техника плазменных источников ионов / М. Д. Габович. - М.: Атомиздат, 1972.- 91-109 с.
4. Бибишкин, М.С. Новая разборная трубка для мягкого рентгеновского излучения / М. С. Бибишкин и др. - М.: Наука, Поверхность №2, 2003. - 43-47 с.
5. Ионно-плазменный источник с накальным катодом / Н. М. Акылбек, К. М. Ахметов, Ж. Ж. Иманбеков, К. Б. Тныштыкбаев. - Патент РК №19633, от 16.06.2008г., бюл. №6.

### ҮЗДІКСІЗ ӘРЕКЕТ ЕТЕТІН ИОНДЫ-ПЛАЗМАЛЫҚ КӨЗДІҢ МАКЕТІ

Ақылбек Н.М., Ахметов К.М., Алдияров Н.У., Бекен Р.Е.

ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

Мақалада үздіксіз әрекеттегі ионды-плазмалық көздің макетін жасау барысында жүргізілген жұмыс нәтижелері келтірілген. Алынған сараптау нәтижелері, жасалған ионды-плазмалық көздің негізгі техникалық параметрлері басқа жоғарғы тоқты иондық көздердің параметрлерінен кем түспейтіндігін көрсетті. Жасалынған ионды-плазмалық көзді беттік наноқабаттарды алу және өңдеу технологиясында қолдануға болады.

### MODEL OF THE CONTINUOUS ACTION IONIC-PLASMA SOURCE

N.M. Akilbek, K.M. Ahmetov, N.U. Aldiarov, R.B. Beken

Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty, Kazakhstan

The results of the research on working out of a continuous action ionic-plasma source are presented. The analysis of the obtained data has shown the developed ionic-plasma source does not concede on the basic technical parameters. The ionic-plasma source can be used in the technology of reception and processing and nanostructures.



УДК 621.384.653

## УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ ЦИКЛОТРОНА ДЦ-60 В г. АСТАНА. ПОЛУЧЕНИЕ УСКОРЕННЫХ ПУЧКОВ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ И ПЕРВЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Горлачев И.Д., Глушенко Н.В., Князев Б.Б., Лысухин С.Н., Платов А.В.

*Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан*

В сентябре 2006 г. в г. Астана состоялся физический пуск ускорительного комплекса на базе циклотрона ДЦ-60. За прошедшее время эксплуатации отработаны режимы ускорения тяжелых ионов, таких как  $^{14}\text{N}$ ,  $^{84}\text{Kr}$ ,  $^{40}\text{Ar}$  и  $^{132}\text{Xe}$ . Это позволило провести серию технологических и экспериментальных работ на ускорителе. В представленной статье приводится описание ускорительного комплекса, а также первые результаты аналитических исследований. В настоящее время работы на ускорителе продолжаются

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ускоренные пучки тяжелых ионов находят все большее применение в различных областях науки и техники. Синтез сверхтяжелых элементов, модификация материалов с целью изменения их физико-химических характеристик, исследование элементного состава образцов, получение ядерных фильтров на базе полимерных материалов – вот далеко не полный перечень направлений, где используются высокоэнергетичные пучки тяжелых ионов.

К особенностям ускорителя тяжелых ионов на базе циклотрона ДЦ-60, введенного в эксплуатацию в 2006 году в г. Астана, можно отнести конструктивное сочетание технологического и экспериментальных каналов транспортировки пучка, объединенных в единый ускорительный комплекс. Это позволяет без перестройки параметров ускорения развивать на циклотроне как технологические, так и исследовательские направления.

### УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

Схема ускорительного комплекса приведена на рисунке 1. Ускорительный комплекс включает:

- источник ионов ECR типа с системой аксиальной инжекции пучка в циклотрон;
- циклотрон ДЦ-60;
- четыре канала транспортировки пучка;
- систему управления;
- три мишенных и одну технологическую камеры.

ЭЦР – источник ионов является одной из принципиальных частей ускорителя. Он может служить инжектором циклотрона, обеспечивая тяжелыми ионами несколько экспериментальных каналов высоких энергий. С другой стороны, он также может работать автономно в качестве источника интенсивных пучков многозарядных ионов.

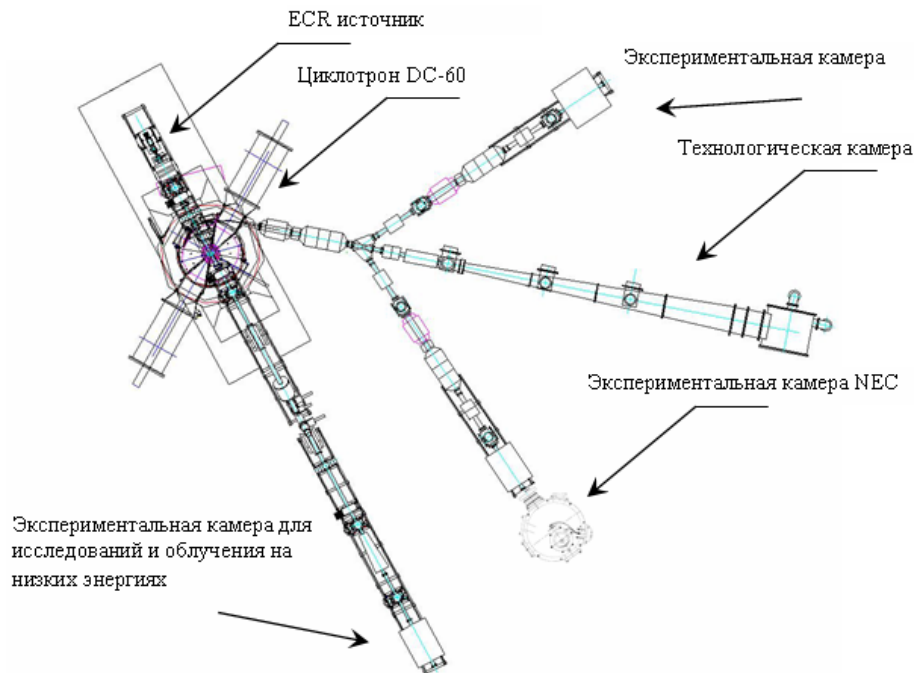


Рисунок 1. Схема ускорительного комплекса

За основу конструкции ЭЦР - источника ионов взяты магнитное и механическое строение источников ионов DECRIS-2 и DECRIS-3 [1]. Для удержания плазмы и электронного нагрева на «ЭЦР – поверхности» используется конфигурация магнитного поля «minimum B». Эта конфигурация получается в результате суперпозиции аксиального поля магнитного зеркала и радиального поля секступольного магнита. Две отдельные катушки с железным ярмом формируют аксиальное магнитное поле, а радиальное магнитное поле создается постоянным секступольным магнитом NdFeB.

Рабочая частота СВЧ – генератора ЭЦР – источника ионов – 14 ГГц. Разрядная камера источника ионов имеет изоляцию, выдерживающую напряжение до 25 кВ. Экстракция электронов осуществляется двумя элементами с плазменным электродом и подвижным вытягивающим электродом.

Для транспортировки пучка от ЭЦР – источника ионов к центру циклотрона была создана эффективная система аксиальной инжекции пучка, состоящая из:

- фокусирующих элементов;
- анализирующего магнита;
- диагностирующих элементов;
- банчера;
- вакуумных насосов;
- электростатического инфлектора.

Ожидаемый захват фаз для ускорения в центре циклотрона составляет около  $30^\circ \pm 35^\circ$ . Это означает, что не более чем 10% требуемого заряда пучка ионов будет вовлечено в процесс ускорения. Для увеличения эффективности захвата пучка системой аксиальной инжекции устанавливается банчер с синусоидальной волной, который группирует частицы пучка в необходимом диапазоне фаз и увеличивает коэффициент захвата до 30÷50%. Поворот пучка от вертикального аксиального канала инжекции в медианную плоскость циклотрона осуществляется с помощью электростатического инфлектора. Как правило, для этих целей используются спиральные инфлекторы или электростатические зеркала.

Максимальная энергия ускоренных ионов – 1.67 МэВ/нуклон. Вариация энергии ионов в диапазоне от 0.42 до 1.67 МэВ/нуклон обеспечивается за счет изменения заряда ускоряемых частиц и магнитного поля циклотрона.

Высокочастотная система имеет вариацию частоты в диапазоне 12 – 18 МГц и обеспечивает ускорение ионов на 4 и 6 гармониках.

Циклотрон позволяет реализовать:

- диапазон ускоряемых ионов:  ${}^6\text{Li} - {}^{132}\text{Xe}$ ;
- диапазон ускоряемых ионов по отношению массы к заряду:  $A/Z = 6 - 12$ .

Для вывода пучка ионов из циклотрона используется электростатический дефлектор с напряженностью электрического поля 75 кВ/см, расположенно- го во впадине магнита.

Каналы транспортировки пучков от циклотрона к мишенным камерам включают стандартные системы фокусировки и поворота ускоренных ионов.

В таблице 1 приведены энергии ионов и полученные на мишени интенсивности пучков.

*Таблица 1. Параметры ускоренного и экстрагированного пучков циклотрона DC-60*

Ион	E, МэВ/нуклон	E, МэВ	I <sub>extracted</sub> , pps
${}^{14}\text{N}$	1.22	17	$6 \cdot 10^{13}$
${}^{40}\text{Ar}$	0.6	24	$3 \cdot 10^{13}$
${}^{40}\text{Ar}$	0.94	38	$2 \cdot 10^{13}$
${}^{40}\text{Ar}$	1.35	54	$2 \cdot 10^{13}$
${}^{84}\text{Kr}$	1.03	86	$3 \cdot 10^{12}$
${}^{84}\text{Kr}$	1.44	121	$2 \cdot 10^{12}$
${}^{132}\text{Xe}$	1.0	132	$1 \cdot 10^{12}$
${}^{132}\text{Xe}$	1.52	200	$1 \cdot 10^{12}$

Система управления ускорителем обеспечивает:

- создание базы данных параметров ускорителя и ионно-оптических каналов, позволяющей автоматически восстанавливать режимы работы ионно-оптических элементов ускорительного комплекса в зависимости от сорта, зарядового состояния и энергии ионов в рамках технических возможностей ускорителя.

Экспериментальные и технологические камеры (рисунок 1):

- экспериментальная камера для облучения физических мишеней пучками ионов низких энергий с системой контроля тока пучка, однородности поля облучения, а так же контроля и регулирования температуры мишени;
- технологическая камера для облучения полимерных пленок;
- экспериментальная камера для облучения физических мишеней пучками ионов высоких энергий с системой контроля тока пучка, однородности поля облучения, а так же контроля и регулирования температуры мишени;
- экспериментальная камера NEC для спектретрических исследований.

#### **МИШЕННАЯ КАМЕРА NEC**

На рисунке 2 показана мишенная камера NEC, предназначенная для проведения ядерно-физических исследований на ускорителе ДЦ-60.

Мишенная камера изготовлена из цельного блока алюминия с внутренним диаметром - 430 мм и внутренней высотой - 200 мм. Основание камеры имеет толщину 50 мм для обеспечения стабильной поддерживающей базы для манипуляторов мишени, детекторов частиц, коллиматора пучка и турбомолекулярного насоса. Вакуумный шлюз для загрузки мишени располагается на крышке; он обеспечивает быструю (меньше чем за 5 минут) смену держателей мишени без нарушения высокого вакуума в камере. Камера оснащена смотровым отверстием и видео камерой для регулировки положения мишени. Она электрически изолиро-

вана от “земли” с целью использования ее в качестве цилиндра Фарадея для измерения тока пучка.

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

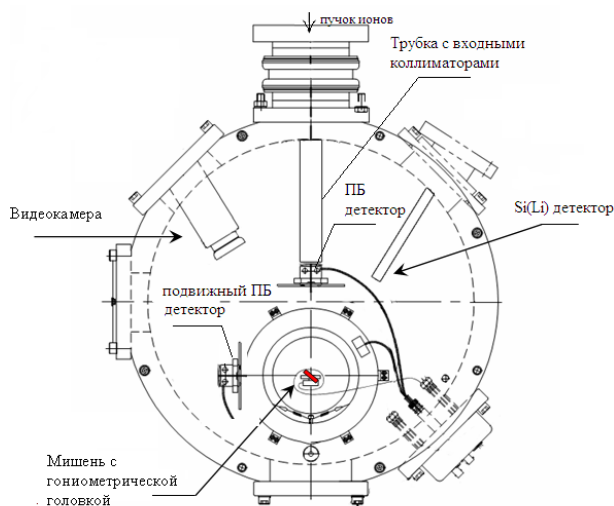


Рисунок 2. Мишениная камера NEC

Камера оснащена мишенным манипулятором с вакуумными двигателями и повторителями, обеспечивающими вращательное и возвратно-поступательное перемещение образца: X и Z движение на  $\pm 8$  мм и Y движение на  $\pm 50$  мм с разрешением 0,0025 мм, Y или тета ось вращения ( $\theta$ ) на  $90^\circ$  с разрешением  $0,01^\circ$ . Вдоль оси Z или Фи ( $\phi$ ) вращение непрерывное с разрешением  $0,01^\circ$ .

Для регистрации заряженных частиц камера оснащена двумя кремниевыми поверхностно-барьерными детекторами площадью  $50 \text{ мм}^2$ : один установлен стационарно под углом  $170^\circ$  по отношению к направлению движения пучка и предназначен для регистрации обратно-рассеянных ионов (метод RBS), второй – перемещаемый в диапазоне углов  $\pm 90^\circ$  предназначен для детектирования эластично-рассеянных частиц (метод ERDA). В состав спектрометрических трактов входят предусилители, спектрометрические усилители, высоковольтные источники питания и аналого-цифровые преобразователи MCA. Для обработки спектров обратно-рассеянных частиц используется программа RUMP.

Для регистрации вторичного рентгеновского излучения (PIXE анализ) в камере предусмотрен  $30 \text{ мм}^2$  Si(Li) детектор, расположенный под углом  $45^\circ$  к направлению движения пучка, в комплекте со сменщиком рентгеновских фильтров, предусилите-

лем, спектрометрическим усилителем и аналого-цифровым преобразователем. Ручное перемещение детектора с шагом 1 мм позволяет легко менять расстояние от мишени до кристалла анализатора, изменяя, таким образом, телесный угол, стягиваемый детектором. Программа GUPIXE, разработанная в университете GUELTH, позволяет обрабатывать PIXE спектры, определять интенсивности рентгеновских пиков, вычислять содержания химических элементов и вычислять пределы обнаружения элементов для тонких и толстых образцов. Программа использует нелинейную подгонку методом наименьших квадратов с модификацией формы пика и учитывает наложения пиков, пики вылета, фон, материал фильтра, матричную коррекцию и вторичную флуоресценцию для толстых мишеней.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ

#### Метод регистрации характеристического рентгеновского излучения с ионным возбуждением (PIXE)

При возбуждении атома ускоренными заряженными частицами происходит образование свободных мест (вакансий) на внутренних электронных оболочках этих атомов. Переход атомов в основное состояние сопровождается двумя процессами: вылетом оже-электронов (преобладающими в случае легких атомов) и испусканием характеристического рентгеновского излучения, которое преобладает для тяжелых атомов. Соотношение между этими процессами определяется величиной выхода флуоресценции. Энергия излучения зависит от оболочек, между которыми происходит переход в ионизованном атоме. Энергия рентгеновских квантов является функцией атомного номера определяемого элемента. В элементном анализе с помощью характеристического рентгеновского излучения, инициированного ускоренными ионами, обычно используются  $K_{\alpha,\beta}$  и  $L_{\alpha,\beta,\gamma}$  линии.

В случае ускорителя DC-60 метод PIXE может позволить анализировать содержание химических элементов в диапазоне от натрия до свинца для разных типов анализируемых объектов. В этом случае в качестве источников возбуждения вторичного рентгеновского излучения могут быть использованы ускоренные пучки азота, аргона и криптона с энергией  $\sim 1 \text{ МэВ/нуклон}$ . Выбор типа ионов определяется спектром анализируемых элементов и требуемой чувствительностью.

Для повышения чувствительности анализа в области тяжелых элементов между образцом и детектором может быть размещен фильтр, позволяющий селективно поглощать низкоэнергетические рентгеновские кванты, уменьшая, таким образом, интегральную загрузку спектрометрического тракта.

Другим перспективным исследовательским направлением деятельности на ускорителе ДЦ-60 может быть изучение сечений ионизации внутренних

оболочек атомов разных элементов. Эти характеристики используются в качестве фундаментальных констант в разных вариантах метода PIXE. Подобные исследования тем более важны, что в научной литературе практически отсутствуют данные по сечениям ионизации внутренних оболочек атомов тяжелыми ионами.

Изучение возможности элементного анализа на ускорителе ДЦ-60 было начато с образцов нержавеющей стали как наиболее легкого и доступного объекта исследований. На рисунке 3 показан рентгеновский спектр, полученный при облучении пучком  $Kr^{12+}$  энергией 1 МэВ/нуклон, образца нержавеющей стали (18% Cr, 10% Ni, ~2% Mn, 70% Fe). Ток пучка на мишени в эксперименте составлял ~0.3 нА, интеграл тока на мишени ~3 мкКулон.

Спектр, представленный на рисунке 3, имеет две особенности в сравнении с аналогичными спектрами с возбуждением характеристическим рентгеновским излучением (РФА анализ) и при возбуждении атомов мишени протонами:

- В спектре помимо рентгеновских линий, соответствующих матричным элементам образца (Fe, Cr, Ni, Mn), присутствуют К и L линии криптона. Излучение линий криптона возникает вследствие ионизации налетающих ионов атомами мишени (инверсный вариант PIXE).

- Линии характеристического излучения в данном случае сильно уширены и асимметричны – присутствуют затянутые высокоэнергетичные хвосты. Это более ярко демонстрирует рисунок 4, на котором показаны рентгеновские спектры, полученные при облучении медной фольги рентгеновскими квантами с энергией 22.1 кэВ и пучком криптона с энергией 1 МэВ/нуклон.

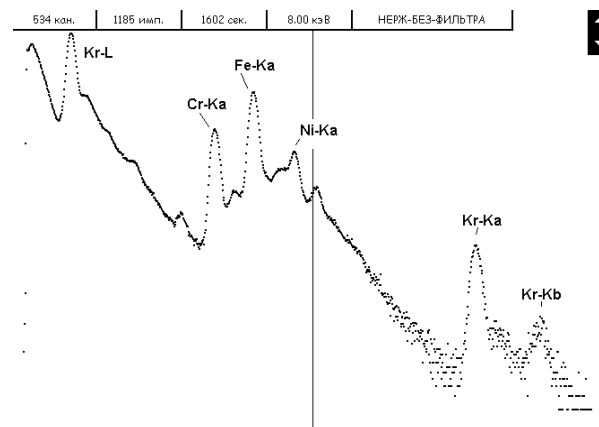


Рисунок 3. Рентгеновский спектр, полученный при облучении образца нержавеющей стали пучком  $Kr^{12+}$

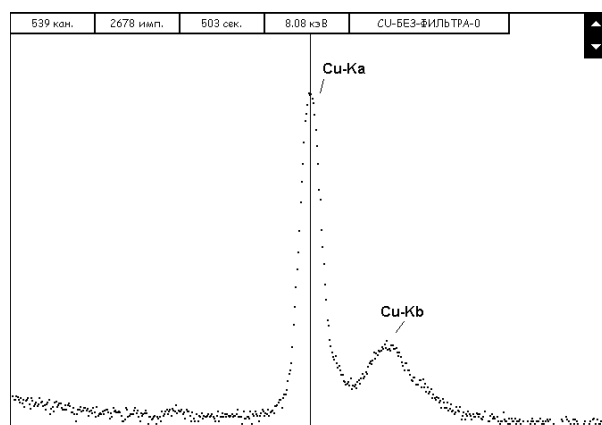
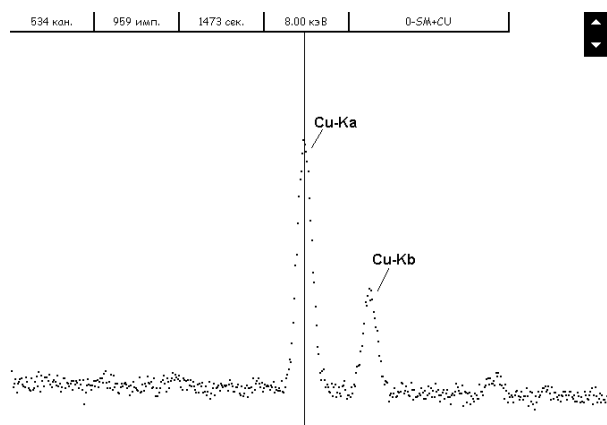


Рисунок 4. K-линии меди, полученные при облучении медной фольги рентгеновскими квантами с энергией 22.1 кэВ (левый спектр) и пучком криптона с энергией 1 МэВ/нуклон (правый спектр)

Уширение пиков приводит к существенным искажениям формы линий и, как следствие, может привести к появлению дополнительных погрешностей в определении площади пиков. Поэтому для решения поставленных задач чрезвычайно важно понимание физических основ наблюдаемого явления и корректное описание уширенных пиков.

Явление уширения рентгеновских пиков при ионизации атомов мишени тяжелыми ионами известно с 1977, когда была опубликована монография S. Mogita и M. Kamiya [2]. Однако исследований этого явления до сих пор в мире проведено немного.

Уширение рентгеновских пиков вызвано многократной ионизацией внутренних оболочек атомов мишени. При столкновении налетающего иона с атомом мишени электроны внутренних оболочек атомов мишени с определенной долей вероятности переходят на стабильные уровни налетающего иона, что приводит к ионизации атомов мишени. Это явление называется эффектом передачи заряда. Таким образом, имеется вероятность одновременной многократной ионизации, например ионизация К-оболочки сопровождается ионизацией L-оболочки. Обычно эти эффекты невелики – менее нескольких процентов в случае легких налетающих ионов. В случае бомбарди-

ровки мишени тяжелыми ионами, однако, вероятность многократной ионизации становится больше и приводит к серьезному влиянию на выход флуоресценции или вероятности переходов Coster-Kronig. На рисунке 5 можно наблюдать различные сателлитные структуры K-линий кальция, обусловленные одновременной многократной ионизацией, полученные при бомбардировке мишени протонами, альфа-частицами и ионами кислорода. Спектры регистрировались с помощью высокоразрешающего кристалл-спектрометра. Как видно из рисунка 5, протонно-индуцированный спектр весьма схож со спектрами, полученными при электронной или гамма-ионизации. В случае бомбардировки кислородом имеются сателлитные линии соответствующие одновременной многократной ионизации, сопровождаемой образованием вакансий O-5 L-уровней.

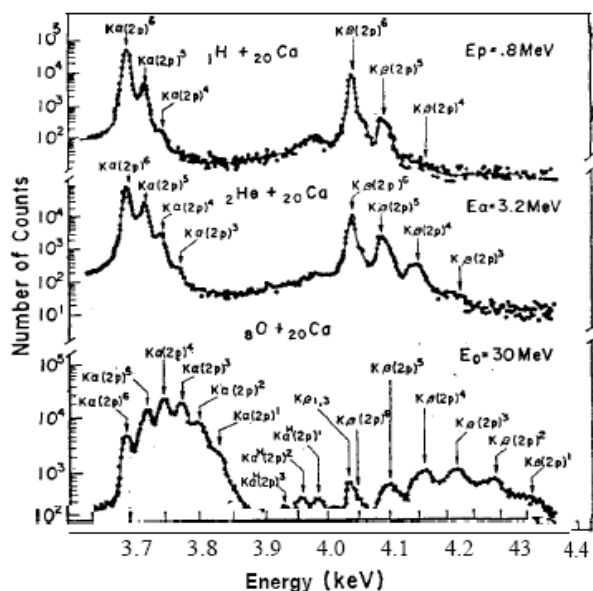


Рисунок 5. Рентгеновские спектры кальция, полученные при облучении мишени 0.8 МэВ водородом, 3.2 МэВ гелием и 30 МэВ кислородом [2]

Для описания таких спектров требуется специализированное программное обеспечение, учитывающее все возможные варианты сателлитных переходов. Такое программное обеспечение в настоящее время разрабатывается в ИЯФ НФЦ РК. С этой целью рассматривается два подхода спектральной обработки. Первый из них, описанный в статье [3], используя общие аргументы центральной граничной теоремы, описывает комплексные рентгеновские спектры как профиль Vogtian подгонки с входными параметрами ширины пиков, которые могут быть получены из многоконфигурационных Dirac-Fock (MCDF) вычислений. Пример обработки рентгеновского спектра, полученного при облучении палладиевой мишени пучками 279 МэВ  $O^{7+}$  и 178 МэВ  $Ne^{6+}$  (рисунок 6). Альтернативный подход к анализу рентгеновских спектров, испускаемых многократно-ионизованными атомами описан в современной работе Horvat et al. [4].

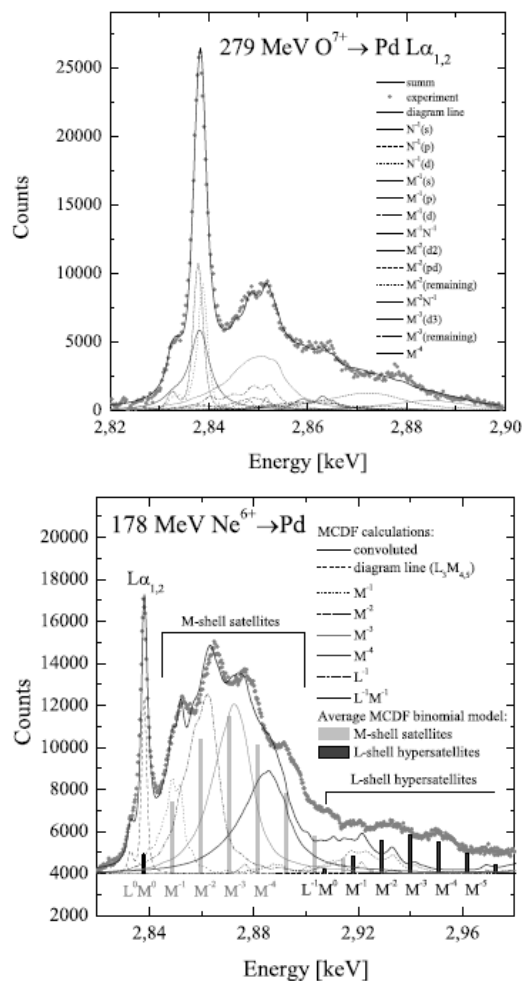


Рисунок 6. Пример обработки рентгеновского спектра, полученного при облучении палладиевой мишени пучками 279 МэВ  $O^{7+}$  и 178 МэВ  $Ne^{6+}$

### Выводы

В результате проведенных на ускорителе ДЦ-60 работ получены ускоренные пучки ионов как  $^{84}Kr$ ,  $^{40}Ag$  и  $^{132}Xe$ . В настоящее время продолжают работы по расширению энергетического диапазона круга ускоренных ионов.

Первые результаты аналитических исследований показывают, что спектры характеристического рентгеновского излучения, получаемые как результат ионизации внутренних оболочек как атомов мишени, так и налетающих ионов, имеют специфические особенности, отличающие их от аналогичных спектров при возбуждении атомов мишени первичным рентгеновским излучением, электронами или протонами. Эти особенности приводят к дополнительным сложностям в обработке спектров и вычислении площади под пиками. В настоящее время разрабатывается специализированное программное обеспечение, учитывающее особенности взаимодействия тяжелых ионов с веществом мишени.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kutner, V. Operation and Resent Development of ECR Ion Sources at the FLNR (JINR) Cyclotrons / V.Kutner et al. // Proceedings of 15<sup>th</sup> International Conference on Cyclotron and their Applications. – Caen, France, 1998. –P.405-408.
2. Morita, S. Inner-shell Ionization by Heavy Charged Particles / S. Morita and M. Kamiya // Chinese Journal of Physics. – 1977. – Vol. 15, N. 3.
3. Czanota, M. Multiple Ionization Effects in X-ray Emission Induced by Heavy Ions. / M. Czanota et.al. // Brazilian Journal of Physics. – 2006. –Vol. 36, N. 2B.
4. Nuclear Instruments and Methods / M. Czarnota et.al. –2003. –B 205. – 133 p.

#### АСТАНА ҚАЛАСЫНДАҒЫ ДЦ-60 ЦИКЛОТРОН НЕГІЗІНДЕГІ УДЕТКІШ КОМПЛЕКСІ. АУЫР ИОНДАРДЫҢ УДЕТІЛГЕН ШОҒЫРЛАР ЖӘНЕ АЛҒАШҚЫ АНАЛИТИКАЛЫҚ НӘТИЖЕ АЛУ

Горлачев И.Д., Глущенко Н.В., Князев Б.Б., Лысухин С.Н., Платов А.В.

*ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан*

ДЦ-60 негізіне 2006 жылы қыркүйек айында Астана қаласында удеткіш комплексінің физикалық іске қосылуы болып өтті. Өткен пайдаға асыру кезеңдерде  $N^{14}$ ,  $Kr^{84}$ ,  $Ar^{40}$  және  $Xe^{132}$  сияқты ауыр иондар удету режимінде пайдаланған. Бұл удеткіште экспериментал және технологиялық жұмыстар топтамасын жүргізуге мүмкіндік берді. Бұл мақалада удеткіш комплексінің сипаттамасы, сонымен қатар алғашқы аналитикалық зерттеулер нәтижелері көрсетілген. Қазіргі кезеңде удеткіш комплексте жұмыстар жүргізіліп жатыр.

#### ACCELERATING COMPLEX ON THE BASIS OF CYCLOTRON DC-60 IN ASTANA. RECEIVING OF HEAVY ION BEAM AND FIRST ANALYTICAL RESULTS

I.D. Gorlachev, N.V. Gluchshenko, B.B. Knyazev, S.N. Lysuhin, A.V. Platov

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

In September 2006 in Astana physical start of accelerating complex on the basis of cyclotron Dc-60. During past time of exploitation conditions of heavy ion, like  $^{14}N$ ,  $^{84}Kr$ ,  $^{40}Ar$  and  $^{132}Xe$ , accelerating were polished. It allowed carrying out series of technological and experimental works with accelerator. In this article description of accelerating complex and also the first results of analytical researches are presented. At present time works with accelerator continue.

УДК 536.2.088.8

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ ПЕРСПЕКТИВНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ВВЭР

Свинухов Д.С., Жданов В.С., Бакланов В.В., Саблук В.В.

*Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

Реализован импульсный метод определения теплофизических свойств образцов оксидного топлива в форме дисков. Решена проблема температурных измерений теневой поверхности образцов с помощью термпары без спая. Проведены верификационные измерения теплофизических свойств материалов с известными свойствами.

### ВВЕДЕНИЕ

Казахстан, обладающий значительными запасами урана, способен обеспечить максимальный предел добываемого урана, вплоть до организации производства топливных элементов и тепловыделяющих сборок. В этой связи АО УМЗ "Ульбинский металлургический завод" планирует опытное производство перспективного уран-бериллиевого и композитного уран-гадолиниевого топлива, создание которого позволит повысить эксплуатационные характеристики для промышленных энергетических легководных реакторов. ИАЭ НЯЦ РК взял на себя разработку и экспериментальное обоснование методик реакторных и вне реакторных исследований эксплуатационных характеристик нового перспективного топлива.

Теплофизические свойства (ТФС) разработанного топлива в исходном состоянии, в диапазоне рабочих температур, а также после термического и реакторного испытаний, являются одной из важных и малоизученных на данный момент эксплуатационных характеристик топлива. Для их изучения было решено разработать методику и изготовить лабораторную установку по определению ТФС топливных образцов в диапазоне температуры 20...1000°C.

Отличительной чертой исследования теплофизических характеристик ядерного топлива является необходимость радиационной защиты персонала, обслуживающего измерительные установки. Другим важным условием теплофизического эксперимента является организация и контроль граничных условий, учитывающих теплообмен исследуемого образца с окружающей средой. Поэтому метод измерения и конструкция измерительной установки должны выбираться исходя из этих требований.

Выбор импульсного метода определяется, кроме того, относительной простотой его технической реализации, и, что очень существенно, слабой зависимостью температурного отклика от теплообмена образца с окружающей средой (что обуславливается малой длительностью единичного измерения).

### ОПИСАНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТФС

Сущность метода «вспышки», впервые описанного в работах В.Дж. Паркера [1], а в последствии модифицированного в ИАЭ НЯЦ РК (авторское свидетельство СССР №873087) [2], заключается в нагреве одного из торцов плоского образца ( $x = 0$ )

кратковременным воздействием теплового импульса (мощной осветительной лампы, омическим нагревом и т.д.) на один из торцов исследуемого образца и регистрации временной зависимости температуры на противоположном торце образца ( $x = L$ ). Теория метода основывается на использовании температурного распределения в плоском теплоизолированном образце, начальная температура которого условно принята равной нулю, что позволяет значительно упростить обработку экспериментальных данных, автоматизировать систему измерений, а также повысить точность базового метода «вспышки».

Уравнение распределения температуры выглядит следующим образом:

$$T(x, \tau) = \frac{Q}{c\gamma L} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \frac{n\pi x}{L} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 a \tau}{L^2}\right) \right], \quad (1)$$

где  $Q$  – энергия импульса;  $\tau$  – время достижения заданного значения температуры;  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $Cp$  – удельная теплоёмкость;  $\rho$  – плотность материала;  $L$  – толщина образца.

На поверхности  $x = R$  изменение температуры во времени запишется как:

$$T(L, \tau) = \frac{Q}{c\gamma L} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 a \tau}{L^2}\right) \right] \quad (2)$$

При введении безразмерных переменных:

$$Q(L, \tau) = T(L, \tau) / T_m, \xi = \pi^2 a \tau / L^2 \quad (3)$$

где  $T_m$  – максимальная температура.

Зависимость  $\Theta(\xi)$  графически представлена на рисунке 1. Используя этот график и уравнение (3), можно получить формулу для определения коэффициента температуропроводности  $a$ . Оптимальным условием в этом случае является равенство  $T/T_m = 0,5$ . Тогда если  $\Theta = 0,5$ , то  $\xi = 1,38$ , а величина коэффициента температуропроводности:

$$a = 1,38L^2 / (\pi^2 \tau_{0,5}) \quad (4)$$

где  $\tau_{0,5}$  – время, за которое поверхность образца  $x = L$  нагревается до половины максимальной температуры.

Удельная теплоемкость может быть найдена из выражения:



$$C_p = \frac{Q'}{m\Delta T},$$

где  $Q'$  - тепло выделяемое нагревателем на один образец;  $\Delta T$ - перепад температуры на торце таблетки.

Энергия на нагревателе:

$$Q = \frac{U^2}{2R} \cdot \tau_{им}$$

где  $Q$  - энергия на нагревателе

Плотность тепловыделения:

$$Q' = Q/S$$

Тогда формула для расчета теплопроводности:

$$\lambda = a \cdot c \cdot \rho$$

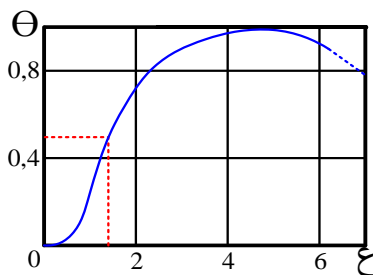


Рисунок 1. Зависимость безразмерной температуры  $\Theta$  на поверхности  $x = L$  от безразмерного времени  $\zeta$

Практическая реализация метода основана на формировании теплового импульса на одном из торцов образца в виде диска, и регистрации температурных откликов на поверхности противоположной нагреваемой тепловым импульсом с их последующей обработкой. Тепловой импульс формируется на торце дискового образца в месте стыка с другим таким же образцом за счет выделения джоулева тепла в плоском нагревателе, помещенном между двумя одинаковыми образцами.

На рисунке 2 приведена схема определения ТФС с односторонним измерением температуры образца.

С момента первой публикации Паркера [1] появилось множество работ в нашей стране и за рубежом [3], в которых метод подвергался всесторонним исследованиям и усовершенствованиям.

Введение поправок на тепловые потери расчетным методом не лишены недостатков в силу необходимости ряда вводимых допущений и неопределенности свойств многих материалов при высокой температуре (в частности, излучательной способности для учета лучистого теплообмена). В связи с этим был предложен метод, позволяющий выполнить замеры искомых параметров в диапазоне времени, когда влияние теплообмена еще не искажает формы температурного отклика. Дифференциальный метод [2, 4] основан на измерении наперед заданного отношения температур на фронтальной и тыльной поверхностях образца.

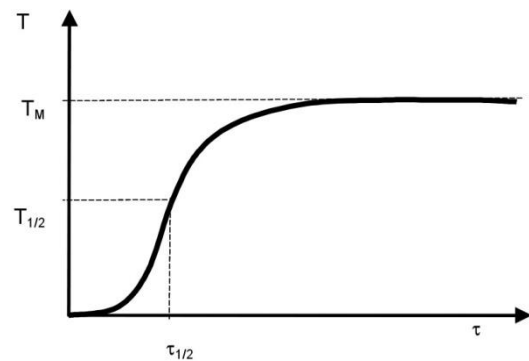


Рисунок 2. График изменения температуры на тыльной поверхности образца и схема измерения теплофизических характеристик в одностороннем варианте метода

Распределение температуры в плоской бесконечной пластине толщиной  $L$ , на одной из поверхностей которой ( $x=0$ ) действует плоский импульсный источник тепла, описывается уравнением:

$$T(x, \tau) = T_M \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \frac{n\pi x}{L} \exp \left( -\frac{n^2 \pi^2}{L^2} a\tau \right) \right],$$

где  $x$  – текущая координата от 0 до  $L$ ;  $\tau$  – время, с;  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $m^2/c$ .

Расчетное соотношение для коэффициента температуропроводности:

$$a = \frac{\xi_0 L^2}{\pi^2 \tau_{2,97}},$$

где  $\tau_{2,97}$  – момент времени, когда отношение температур на противоположных поверхностях образца в результате теплового импульса равно:

$$\frac{T(0, \tau_{2,97})}{T(L, \tau_{2,97})} = \frac{Q_0 \xi_0}{Q_L \xi_0} = 2,97,$$

Удельная теплоемкость материала может быть определена как:

$$C_p = \frac{q}{\rho L T_M}, \quad T_M = T(0, \tau_{2,97}) - T(L, \tau_{2,97}) = \Delta T,$$

где  $\rho$  - плотность материала,  $\text{кг/м}^3$ ,  $C_p$  – удельная теплоемкость,  $\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $q$  – удельная энергия теплового импульса,  $\text{Дж/м}^2$ .

Тогда расчетное соотношение для теплопроводности ( $\lambda = a \cdot C_p \cdot \rho$ ) запишется как:

$$\lambda = \frac{\xi_0 q}{\pi^2 L T_M \tau_{2,97}} = \frac{1,386 q}{\pi^2 L \Delta T \tau_{2,97}}.$$

На рисунке 3 приведена схема измерения ТФС с двухсторонним измерением температуры (дифференциальный метод).

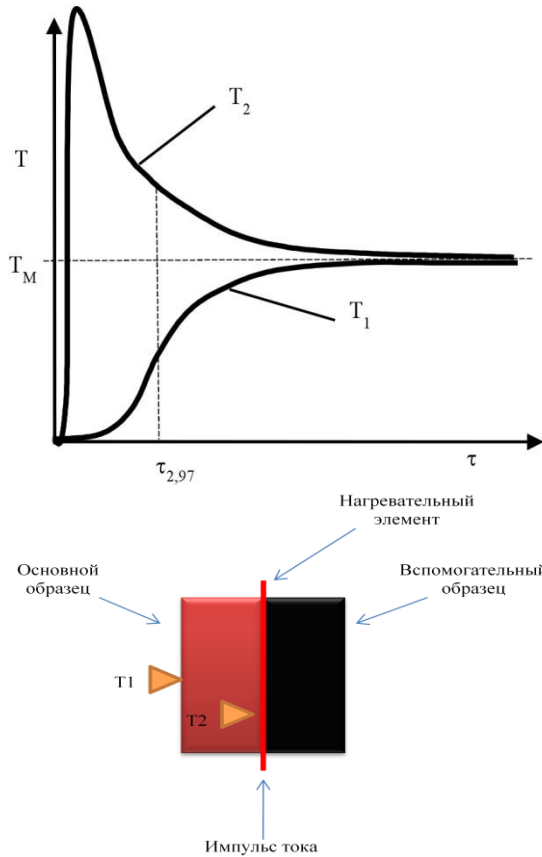


Рисунок 3. График изменения температуры на тыльной поверхности образца и схема измерения теплофизических характеристик и в дифференциальном варианте метода

### УСТАНОВКА УТФИ-2

Созданная установка УТФИ-2 – автоматизированная измерительная система для исследования комплекса теплофизических характеристик модельного оксидного ядерного топлива (температуропроводность  $a$ , теплоемкость  $C_p$ , теплопроводность  $\lambda$ ) на малых образцах в форме тонкого диска методом «вспышки» в широком диапазоне температур.

На рисунке 4 приведена упрощенная структурная схема установки.

Блок источника импульса служит для формирования электрического импульса тока на нагревателе запуск его осуществляется с помощью ЦАП.

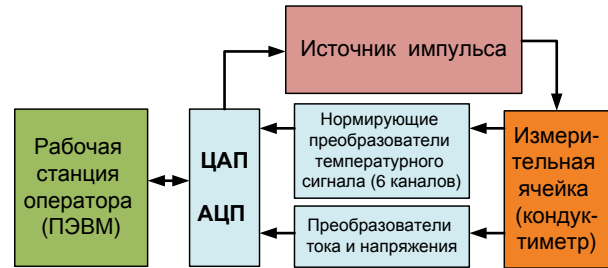


Рисунок 4. Структурная схема установки «УТФИ-2»

В блок измерительной ячейки входят: нагревательный элемент, исследуемый и вспомогательный образец, термопары и зажимное устройство.

Блоки преобразователей используются для нормализации сигналов с термопар и нагревательного канала для АЦП.

Рабочая станция оператора служит для регистрации, обработки и сохранения полученных данных.

Установка позволяет обеспечить следующую последовательность проведения измерения: оператор задает параметры образца (диаметр, толщину, массу), энергию теплового импульса. Производится запуск источника теплового импульса и регистрация кривых нагрева образца. Результаты измерения параметров импульса, а также показания термопар выводятся в таблицу, на график и сохраняются в файл.

Далее производится обработка результатов измерения, определение температуропроводности и максимальной температуры подогрева образца, расчет поглощенной образцом энергии, определение теплоемкости и расчет теплопроводности образца. Измерения при фиксированной температуре, как правило, производятся 5-10 раз для каждого образца.

### КОНСТРУКЦИЯ КОНДУКТИМЕТРА

Измерительной ячейкой установки является кондуктиметр, который представляет собой зажим для закрепления исследуемого образцов, термопар и омического нагревателя. Схема кондуктиметра с обозначением отдельных его узлов приведена на рисунке 5.

Предполагается, что определение ТФС исследуемых материалов будет проводиться как при комнатных температурах, так и при температурах приближенных к реальным условиям эксплуатации исследуемых материалов в ядерном реакторе. Вследствие этого основные детали кондуктиметра изготовлены из жаропрочной нержавеющей стали.

Для исключения образования трещин в образцах оксидного топлива и их разрушений, в конструкции кондуктиметра предусмотрен пружиненный зажим. Усилие зажатия образца также контролируется по сопротивлению между термоэлектродами открытого спая которое по подобранным значением не должно быть более 15 Ом.

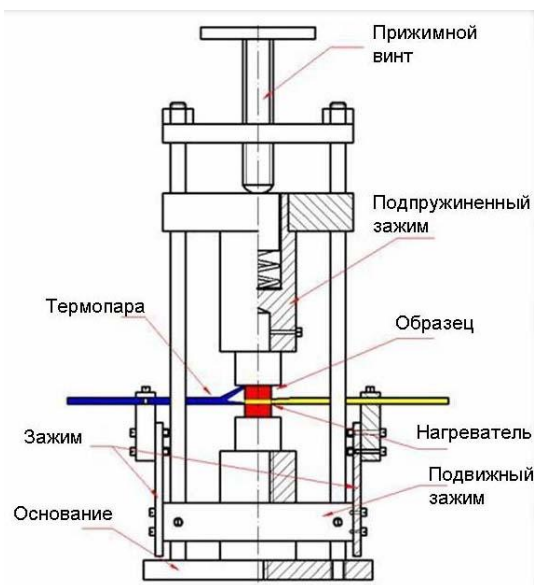


Рисунок 5. Схема кондуктметра

### НАГРЕВАТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

При выборе конструкции элемента ИНЭ и его сопротивления необходимо принять во внимание следующие параметры: силу тока на нагревателе, общее напряжение питания элемента, общую чувствительность аппаратуры, необходимую для регистрации изменений температуры с достаточной точностью при среднем повышении температуры, не превышающем 100°C.

Конструкция импульсного нагревательного элемента должна обеспечивать хороший тепловой контакт с образцом, и минимальное возмущение температурного поля в образце.

Форма и материал, из которого выполняется ИНЭ, может быть различной, но по причине экспериментального удобства ИНЭ обычно имеет какую-либо простую геометрическую форму.

Выбор был остановлен на нагревательном элементе в форме спирали Архимеда в виду простоты конструкционного исполнения и возможности вариации электрофизических свойств материала из которого он изготавливается. Например для проведения отладочных работ нагревательный элемент изготавливается из термопарной проволоки хромель диаметром 0,1 мм. Сопротивление активной части такого нагревателя составила 1 Ом.

Включение и выключение нагревателя происходит синхронно с сетевым напряжением в момент прохождения последнего через ноль. Это гарантирует полное отсутствие электрических помех, что особенно важно при одновременном использовании высокочувствительных измерительных приборов.

Конструкция импульсного нагревательного элемента позволяет работать с образцами, имеющими небольшие габаритные размеры порядка 6 мм в диаметре.

### ИСТОЧНИК ИМПУЛЬСА

Одним из важных моментов создания установки по определению теплофизических свойств материалов является изготовление источника тепловых возмущений. Поскольку в качестве источника теплового импульса в выбранной методике было решено использовать омический нагрев, то был изготовлен трансформаторный блок питания с регулируемой длительностью электрического импульса. Где в качестве рабочего импульса с помощью мощного тиристора выделяется половина полупериода колебаний переменного напряжения сети 50 Гц.

Основное условие, которое выполняется при управлении тиристором, является то, что отпирающие сигналы подаются на управляющий электрод в те моменты, когда напряжение на аноде положительно относительно катода (т.е. управляющие сигналы синхронизированы с частотой сети переменного тока).

Изменяя постоянную времени с помощью переменного сопротивления можно в широких пределах регулировать момент включения тиристора, т.е. менять угол отпирания. Пределы изменения угла отпирания могут быть примерно 5–170°, что позволяет регулировать средний ток в нагрузке от максимального значения почти до нуля.

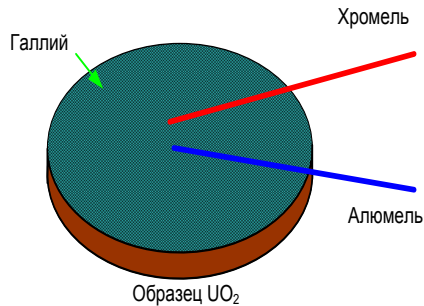
### ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОПАРЫ

Для снижения погрешности, связанной с наличием термопар, необходимо, чтобы оба электрода были близки по своим теплофизическим свойствам, их термоэдс была достаточно высока, а площадь контакта и диаметр минимальны [5]. Изменение температуры поверхности образца после воздействия теплового импульса может регистрироваться двумя способами. В первом случае используется термопара со спаем. Во втором малоинерционная хромель-алюмелевая термопара без королька диаметром 0,1мм. Для повышения надежности гальванической связи термоэлектродов термопар с образцом и снижения электросопротивления термопары, каждый электрод прижимается к поверхности образца пружинным элементом кондуктметра, а поверхность образца, в зоне контакта с термоэлектродом, покрыта слоем галлия толщиной 5-10мкм. При комнатных температурах провода термопары из хромель-алюмеля без спая устанавливаются во фторопластовый диск через два отверстия в центре. Провода разносятся на расстояние 1мм и имеют контакт с поверхностью, составляя через поверхность образца электрическую цепь.

Этим обеспечивается регистрация действительной температуры задней поверхности, а не спая термопары. Внешний вид подготовленной для экспериментов поверхности образца и схематичное расположение термоэлектродов термопары на «теневой» поверхности представлены на рисунке 6.



а – вид образца  $UO_2$  с нанесенным слоем галлия



б – схема расположения электродов термопары на «теневого» поверхности образца

Рисунок 6. Подготовка образца  $UO_2$

Для снижения влияния помех на точность работы усилительного тракта провода, соединяющие его с термопарой, были экранированы.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для расчета линейной мощности теплового импульса были проведены экспериментальные измерения параметров электрического импульса на нагревательном элементе. Схема формирования теплового импульса обеспечивает пропускание тока силой 10–100 А в течение 4-5 мс.

Для расчета значения теплового импульса используются следующие формулы:

$$Q = P \cdot \tau_U = \frac{U^2}{R_n} \cdot \tau_U = const ,$$

$$P = \frac{U^2}{R_n} = const .$$

Используя полученные значения напряжения и длительности, рассчитанное значение энергии теплового импульса составило 3,58 Дж

Для проведения верификационных измерений были взяты бланкетные таблетки из обедненного урана, производства АО УМЗ "Ульбинский металлургический завод", размер таблеток 5,8 мм и 9 мм, диаметр и высота соответственно.

Из данных таблеток на отрезном станке с помощью алмазного круга были изготовлены экспериментальные образцы диаметром 5,8 мм и толщиной около 2 мм. Торцевые поверхности доводились шлифовой наждачной бумагой с зернистостью R800.

Толщина образцов измерялась микрометром МКО -25 (ГОСТ6507-78), измерения проводились не менее 3 раз, для расчета использовалось среднее значение толщины. Для определения массы применялись аналитические весы AG204 производства "Mettler-Toledo" с дискретностью 0,1 мг.

Объем образца при комнатной температуре рассчитывается по формуле:

$$V_0 = \frac{\pi \bar{d}^2 l}{4} ,$$

где  $\bar{d}$  - среднее значение диаметра образца;  $l$  - среднее значение длины образца;  $V_0$  - объем образца при комнатной температуре.

Расчет плотности исследуемых образцов производится по формуле:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\frac{\pi d^2 \cdot l}{4}} ,$$

где  $d^2$  - диаметр образца;  $l$  - толщина образца.

Измерения теплопроводности на образцах в виде дисков (отношение диаметра к толщине 3) выполнялись с применением плоского нагревателя, помещенного между двумя одинаковыми образцами.

1) Коэффициент температуропроводности определяется по формуле:

$$a = 1,38L^2 / (\pi^2 \tau_{0,5}) ,$$

где  $\tau_{0,5}$  – время, за которое поверхность образца  $x = L$  нагревается до половины максимальной температуры.

2) Удельная теплоемкость материала определяется как:

$$C_p = \frac{Q'}{m \Delta T} ,$$

где  $Q'$  - плотность тепловыделения;  $m$  – масса образца;  $\Delta T$  - разница между максимальной и минимальной температурой.

3) Расчетное соотношение для теплопроводности:

$$\lambda = \alpha \times C_p \times \rho ,$$

где  $\rho$  - плотность материала.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТФС

Для верификации метода были выполнены измерения теплофизических характеристик на образцах из нержавеющей стали 12X18Н10Т. При проведении эксперимента с электропроводящими образцами появилась необходимость их изоляции от нагревательного элемента. Для этого использовалась слюда толщиной 10 мкм. Образцы были выполнены в виде дисков толщиной 3 мм, диаметром 10 мм. Полученные значения ТФС с учетом погрешности измерений приведены в таблице 1.



Таблица 1. Значения ТФС для нержавеющей стали

$a, \text{м}^2/\text{с}$	$C, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$
$(3,64 \pm 0,08) \cdot 10^{-6}$	$485 \pm 8$	$13,9 \pm 0,6$

Таблица 2. Значения ТФС для диоксида урана

$a, \text{м}^2/\text{с}$	$C, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$
$(2,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-6}$	$255 \pm 2$	$7,5 \pm 0,5$

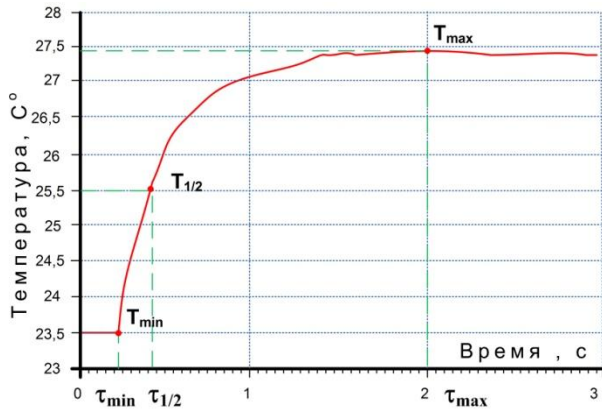


Рисунок 7. Термограмма «теневого» поверхности образца двуокиси урана

Экспериментальные средние значения, полученные при расчете ТФС для нержавеющей стали в пределах погрешностей хорошо соответствует литературным данным [6], что позволяет считать метод работоспособным и продолжать работу над его адаптацией к условиям повышенных температур.

В результате измерений и расчета  $\lambda$ ,  $\alpha$  и  $C$  для образца диоксида урана массой 0,554 г, диаметром 5,78 мм, толщиной 1,98 мм и плотностью  $10,67 \text{ г}/\text{см}^3$  были получены данные, приведенные в таблице 2.

Измерения проводились 10 раз при нормальных условиях, интервал между измерениями составлял

15-20 мин, для выравнивания температуры измерительной ячейки.

В справочнике по теплофизическим свойствам материалов ядерной техники [6] приведены значения для данного материала температуропроводности  $2,72 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , теплоемкости  $245 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ , теплопроводности  $7,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ .

На рисунке 7 показана типовая термограмма «теневого» поверхности образца  $\text{UO}_2$ , отображаемая на экране оператора установки.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы был реализован импульсный метод измерения ТФС, представляющий комбинацию метода «вспышка» и мгновенного источника тепла. Выведены расчетные соотношения для данной методики. Разработана структурная схема экспериментальной установки. Подготовлен комплект конструкторской документации, изготовлены и собраны узлы установки «УТФИ-2». Выбран наиболее подходящий материал и форма для изготовления омического нагревателя. Проведены испытания и настройка установки на тестовых образцах.

Произведена отработка методики на образцах нержавеющей стали марки X18H10T. Полученные результаты ТФС хорошо согласуются с литературными данными.

Были проведены измерения ТФС образцов из двуокиси урана, которые показали удовлетворительный результат, — полученное значение теплопроводности хорошо согласуется с данными некоторых литературных источников.

Следующим шагом в данной проблеме будет расширение температурного диапазона измерений ТФС для оксидного топлива.

#### ЛИТЕРАТУРЫ

1. Parker, W. J. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity / W. J. Parker. [et al.]. // J. Appl. Phys. — 1961. — Vol. 32, № 9. — P.1679.
2. А. с. 873087 СССР. Способ определения теплопроводности материалов / В. С. Жданов., И. В. Михеев., М. Л. Таубин (СССР), заявлено 2.06.81 ; опубл. 30.10.81, Бюл. № 48. — 7 с.
3. Харламов, А. Г. Анализ динамики развития метода «вспышки» и области его применения / А. Г. Харламов, В. Н. Юкович, В. И. Краснов // ИФЖ. — 1978. — Т. 34, № 3. — С. 553–558.
4. Cowan, R. D. Pulse method of measuring diffusivity at high temperatures / R. D. Cowan // J. Appl. Phys. — 1963. — vol. 34, No. 4. — p. 926–939.
5. Разработка и исследование импульсного метода исследований теплофизических характеристик конструкционных материалов : отчет о НИР (промежут.) / ОЭ ПНИТИ ; рук. В. С. Жданов. — Семипалатинск-21, 1978. — 54 с. — Инв. № К-6738.
6. Чиркин, В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / В. С. Чиркин. — М. : Атомиздат, 1968. — 484 с.

**ВВЭР ҮШІН БОЛАШАҚ ОТЫН ҮЛГІЛЕРІНІҢ ЖЫЛУ  
ФИЗИКАЛЫҚ ҚҰРАМЫН АНЫҚТАУ ӘДІСТЕМЕСІ**

**Свинухов Д.С., Жданов В.С., Бакланов В.В., Саблук В.В.**

*ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан*

Диск түрінде оксидті отын үлгілерінің жылу физикалық құрамын анықтаудың импульсті әдісі іске асырылды. Үлгілердің көлеңкеленген бетінің температуралық өлшемдердің дәнекерлеп жабыстырусыз термопара көмегімен мәселе шешілді. Материалдар жылу физикалық құрамының белгілі құрамдармен верификациялық өлшемдері жүргізілді.

**METHOD OF DETERMINING THERMOPHYSICAL PROPERTIES  
OF PERSPECTIVE FUEL SAMPLES FOR VVER**

**D.S. Svinuhov, V.S. Zhdanov, V.V. Baklanov, V.V. Sabluk**

*Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

Pulse method for determining thermophysical properties of samples of oxide fuel in the form of discs is implemented. The problem of temperature measurements of the shadow surface of the samples using thermocouples without junction is solved. Verification of measurement of thermophysical properties of materials with well-known properties is conducted.

УДК 691.039.61

## КАЛИБРОВКА ДВОЙНОГО МНОГОПРОВОЛОЧНОГО ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТОКАМАКА КТМ

Кириленко А.В.

*Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

В статье предложена техника калибровки диагностики, позволяющая определять электронную температуру плазмы токамака КТМ. Оценка электронной температуры основана на методе фильтров с различными абсорбционными характеристиками. Сравнение относительных интенсивностей спектров, полученных с двух камер детектора, позволяет измерять температуру электронов, изменяющуюся во времени. Вычисленные отношения сопоставляются с экспериментальными данными для нахождения температуры.

### ВВЕДЕНИЕ

Для исследования высокотемпературной плазмы токамака КТМ, электронная температура, как один из эффективных показателей нагрева плазмы, может быть определена из электромагнитного излучения. Для этого используется двойной многопроволочный пропорциональный детектор мягкого рентгеновского излучения (далее детектор). Детектор диагностирует электронную температуру ядра горячей плазмы. Также детектор может быть использован для измерения динамических плазменных процессов, таких как пилообразные колебания и другие МГД-неустойчивости.

Калибровка детектора позволяет установить зависимость его показаний от измеряемого физического параметра – электронной температуры.

### КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Диагностика основана на многоканальном (2×32 канала) пропорциональном детекторе рентгеновского излучения, который состоит из двух расположенных друг за другом камер, продуваемых смесью криптона и метана. Данное расположение позволяет использовать первую камеру, направленную на источник рентгеновского излучения, в качестве дополнительного фильтра для второй камеры, конструктивно расположенной за первой.

Схематический вид детектора представлен на рисунке 1.

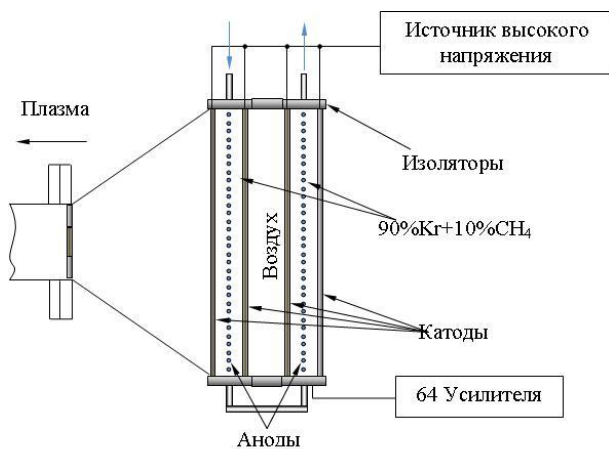


Рисунок 1. Схематический вид конструкции детектора

Принцип действия диагностики основан на абсорбционных свойствах фильтров, расположенных перед двумя линейками детекторов. Излучение сплошного спектра, проходя через фильтры различной толщины, теряет часть своей интенсивности. Полная интенсивность излучения прошедшая через фольгу детектора, интегрированная по энергии, есть величина измеряемая детектором. Отношение сигналов с камер детектора, зависит главным образом от пиковой электронной температуры вдоль хорды наблюдения.

Так как один канал диагностики определяет интегрированный сигнал по хорде наблюдения, это не дает возможность пространственного определения электронной температуры. Для нахождения распределения температуры электронов по полоидальному сечению плазменного шнура используется 32 канала, благодаря этому возможно определение локального излучения, используя алгоритмы инверсии или томографии.

### ИЗЛУЧЕНИЕ ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ

Излучение чистой водородной плазмы с температурой выше 100 эВ преимущественно тормозное. Тормозное излучение испускается свободными электронами, которые ускоряясь в электрическом поле, сталкиваются с ионами плазмы. Интенсивность тормозного излучения  $I_{ff}$  на единицу частоты  $\omega$ , усредненное через распределение Максвелла, представляется выражением 1.

$$I_{ff} d\omega = \frac{16}{3} \left( \frac{2\pi}{3} \right)^{1/2} \times \frac{e^6}{m_e^{3/2} c^3 k_B^{1/2}} \frac{Z^2 N_i n_e}{T^{1/2}} g^{ff} \exp\left(-\frac{\hbar\omega}{k_B T_e}\right) d\omega, \quad (1)$$

Мягкое рентгеновское излучение лежит в диапазоне от 0.1-10 нм (120-12000 эВ).

В область коротковолновой части спектра  $\hbar\omega \gg k_B T_e$  форма спектра для тормозного и рекомбинационного излучения определяется в основном экспоненциальным множителем.

Присутствие примесей в объеме плазмы приводит к рекомбинационному и линейчатому излучению. Линейчатое излучение легких примесей в области мягкого рентгеновского излучения пренебрежительно мало.



### КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРА

Калибровка диагностики состоит из двух частей: первая часть - расчетная, где находится зависимость температуры электронов от отношения сигналов двух камер и вторая часть - относительная калибровка камер пропорционального детектора и усилительного тракта, которая проводилась при помощи источника рентгеновского излучения.

#### Вычисления

Интенсивность излучения прошедшего через абсорбционные фильтры уменьшается пропорционально коэффициентам ослабления энергии фотонов фильтров и лежит в известном диапазоне длин волн. Абсорбционные коэффициенты для фильтров были выбраны из таблицы коэффициентов Хенке [8]. На рисунке 2 представлена расчетная зависимость сигналов с двух камер от энергии фотонов.

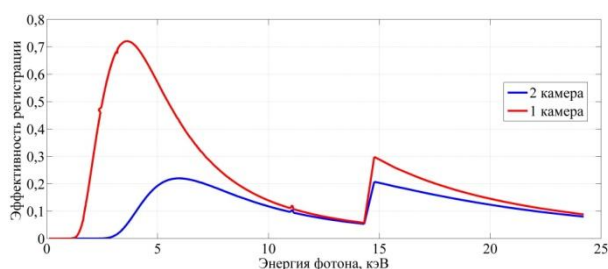


Рисунок 2. Эффективность камер диагностики

При максвелловском распределении скоростей электронов, температура электронов находится из отношения сигналов двух камер, определяемых выражением (2).

$$R(T_e) = \frac{\int_0^{\infty} \exp(-\mu_1 x_1)(1 - \exp(-\mu_2 x_2)) f(E, T_e) dE}{\int_0^{\infty} \exp(-\mu_3 x_3)(1 - \exp(-\mu_4 x_4)) f(E, T_e) dE}, \quad (2)$$

где  $f(E, T_e)$  – спектральная плотность тормозного и рекомбинационного излучений плазмы;  $x_i$  – толщины фильтров;  $\mu_n$  – абсорбционные коэффициенты фильтров.

Для вычисления зависимости электронной температуры плазмы от относительной интенсивности была написана программа, позволяющая по заданной геометрии и выбранным материалам фильтров вычислять температуру электронов.

На рисунке 3 представлена расчетная зависимость температуры электронов от отношения сигналов двух камер. Полученная зависимость может быть описана полиномиальной аппроксимацией 6 порядка.

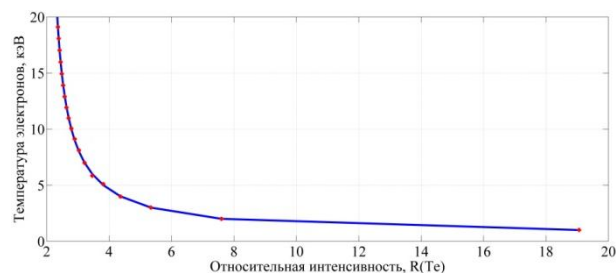


Рисунок 3. Зависимость электронной температуры от относительной интенсивности потоков рентгеновского излучения

#### Измерения

Для калибровки диагностики, две камеры детектора по очереди равномерно облучали лабораторным источником рентгеновского излучения Oxford Instruments HXR-505-50-01 при ускоряющем напряжении 30 кВ, током катода 0,5 мА. Сигналы с камеры регистрировались 32 каналным аналого-цифровым преобразователем.

При разделении детектора на две камеры, обеспечивается условие, при котором каждая камера имеет одинаковую толщину фильтров. Облучая две камеры тормозным рентгеновским излучением с одинаковым спектральным составом, можно учесть разброс выходных сигналов детектора, вызванных: различным газовым усилением пропорционального детектора, разбросом номиналов резисторов в обратной связи усилителей и др. Для этого все сигналы детектора нормируются на один из каналов, чувствительность которого принимается за единицу. В результате, разброс сигналов составил 3,9 % rms.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Достоинством данной диагностики является относительно низкий уровень затрат на ее создание и весьма высокая временная разрешающая способность. Высокое разрешение детекторов позволяет использовать их для исследования развития плазменных неустойчивостей и других релаксационных процессов.

На достоверность результирующих данных главным образом влияет точность определения толщин абсорбционных фильтров, а также появление в плазме надтепловых электронов имеющих неравновесное распределение по скоростям. Причем первая погрешность систематическая и может быть учтена, а вторая случайная, вызывается различными плазменными явлениями, например торможением электронов на первой стенке токамака. Основной потенциальный источник проблем – это примеси углерода и кислорода, но их влияние может быть учтено при помощи измерений другой диагностики – рентгеновского спектрографа и корректировки вычисленных спектров.

В реальных экспериментах на токамаке, для проверки достоверности показаний диагностики, температура электронов определенная из измерений детектором будет сравниваться с температурой определенной при помощи измерения линейчатого излучения примесей и электропроводности Спитцера.

### ВЫВОДЫ

В работе был представлен сравнительно простой метод измерения электронной температуры. Для проведения калибровки была определена математическая модель для нахождения электронной температуры при помощи детектора. Разработано программное обеспечение для расчета зависимости температуры от измеренных значений с учетом абсорбционных свойств камер детектора. Выполнены экспериментальные работы по определению разброса

чувствительности каналов детектора. Калибровка детектора выполненного по схеме абсорбционных фильтров позволит определять температуру электронов в диапазоне от 1 до 14 кэВ.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор работы благодарен Шаповалову Г.В. за ценные обсуждения и замечания, а также другим сотрудникам команды токамака КТМ за помощь в проведении работ по калибровке диагностики.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Sushkov, A. V. TCV High Resolution X-ray Imaging Diagnostic / A. V. Sushkov // Plasma Phys.: report 29th EPS Conference, Montreux, Switzerland, June 2006. – P. 118–121.
2. Xiangjun, Z. The Electron Temperature Estimation Using Soft X-Ray Imaging in HT-7 Tokamak / Z. Xiangjun // Plasma Science & Technology. – 2006. – Vol. 8, № 2. – P. 217–221.
3. de Oliveira, K. A. Using Beryllium and Polypropylene-Aluminium Absorbers to Measure the TBR-1 Tokamak Electron Temperature / K. A. de Oliveira // Brazilian Journal of Physics. – Sep. 1998. – Vol. 28, № 3. – P. 230–235.
4. Очкин, В. Н. Спектроскопия низкотемпературной плазмы / В. Н. Очкин. – М. : Физматлит, 2006. – 472 с.
5. Wesson, J. Tokamaks / J. Wesson. – Oxford University Press, 2004. – 762 p.
6. Подгорный, И. М. Лекции по диагностике плазмы / И. М. Подгорный. – М. : Атомиздат, 1968. – 118 с.
7. Клюев, В. В. Рентгентехника / В. В. Клюев. – М. : Машиностроение, 1980. – 10 с.
8. Henke, B. Filter Transmission / B. Henke // Atomic Data and Nuclear Data Table. – July 1993. – Vol. 54, № 2. – P. 181–342.

## КТМ ТОКОМАГІНІЇ ЖҰМСАҚ РЕНТГЕН СӘУЛЕСІНІҢ ҚОС КӨПСЫМДЫ ПРОПОРЦИОНАЛДЫ ДЕТЕКТОРЫН МӨЛШЕРЛЕУ

Кириленко А.В.

*ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан*

Осы баяндамада КТМ токомагінің плазмасының электрон температурасын өлшеуге арналған құралының мөлшерлеу тәсілі берілген. Электрон температурасын бағалауы әртүрлі абсорбциялық көрсеткіштері бар фильтрлер әдісіне негізделген. Детектордың екі камерасынан алынған спектрлер қатынасы уақыт арасында өзгеретін электрон температурасын өлшеуге мүмкіндік береді. Температураны анықтау үшін есептелген қатынастар эксперименталдық көрсеткіштерімен салыстырылады.

## CALIBRATION OF THE DUPLEX MULTIWIRED PROPORTIONAL SOFT X-RAY DETECTOR FOR THE KTM TOKAMAK

A.V. Kirilenko

*Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

The technique for the diagnostic calibration which allows determining the plasma electron temperature of KTM tokamak was presented in article. Electron temperature estimation based on a filters method with a different absorption characteristics. Comparison of a relative spectral intensity acquired from double-chamber detector makes possible to measure time-resolved electron temperature. Computed ratios are then compared with the experimental data to obtain temperature.

УДК 539.12.04; 539.21

## ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ, ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОННОГО И ПЛАЗМЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

Диков А.С., Ермаков Е.Л., Кислицин С.Б., Полтавцева В.П.

*Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан*

Исследовано влияние импульсного электронного, импульсного плазменного воздействий и нейтронного облучения на изменение физико-механических свойств алюминиевого сплава Д-16. Пределы текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) и прочности ( $\sigma_B$ ), пластичность ( $\delta$ ) материала определялись методом механических испытаний на одноосное растяжение. Сравнительный анализ механических характеристик показал, что импульсная плазменная обработка приводит к наибольшему увеличению прочностных свойств ( $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_B$ ) по сравнению с импульсной электронной обработкой и нейтронным облучением. Импульсная плазменная обработка приводит к снижению пластичности материала, то время как импульсное электронное воздействие и нейтронное облучение повышают пластичность.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что методы радиационной обработки материалов широко применяются в различных областях: стерилизация медицинской продукции, обработка пищевых и сельскохозяйственных продуктов с целью увеличения сроков хранения и уничтожения болезнетворных микроорганизмов, а также для улучшения механических характеристик металлов и сплавов [1].

Задачами данной работы является изучение влияния импульсной электронной и импульсной плазменной обработки, а также нейтронного облучения на прочностные свойства промышленного сплава Д-16 с целью повышения физико-механических характеристик.

В данной работе в качестве объекта исследования был выбран промышленный алюминиевый сплав Д-16 широко использующийся в авиационной, космической промышленности, судостроении, электротехнике и химическом приборостроении. В настоящее время данный материал находит все более широкое применение для производства товаров народного потребления. Кроме того, алюминиевый сплав Д-16 является прекрасным модельным материалом для изучения эффектов радиационного воздействия на структуру и свойства конструкционных материалов атомной энергетики, так, например, применяемый в исследовательских реакторах сплав САВ близок по составу к сплаву Д-16. Под радиационным воздействием в данных исследованиях понимается импульсные электронная и плазменная обработки и нейтронное облучение.

### МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ

#### Материалы

В качестве материала для исследования был выбран промышленный алюминиевый сплав Д-16 относящийся к категории высоколегированных сплавов, основой которых является тройная система Al—Cu—Mg. Проведенные исследования элемент-

ного состава методом рентгенофлуоресцентного анализа приведены в таблице 1.

Таблица 1. Элементный состав промышленного сплава Д-16

Элемент	Al	Mg	Cu	Si	Mn	Fe
Содержание, вес. %	92,51	1,51	4,67	0,56	0,42	0,33

Для проведения исследований изготавливались плоские образцы с размерами рабочей части  $20 \times 3 \times 1$  мм, которые подвергались обработке на гомогенный твердый раствор: отжиг при температуре 773К (выдержка в течение часа) с последующей закалкой в воду. Для отжига использовалась электропечь “SNOL 7.2/1100”, контроль температуры осуществлялся автоматическим, стабильность температуры составляла  $\pm 2^\circ$ . Поверхности образцов шлифовались абразивными материалами с последовательно убывающей величиной зерна до придания гладкой поверхности.

Полученные образцы подвергались реакторному облучению и двум типам радиационного воздействия: импульсным электронным и импульсным плазменным с одно- и двукратными импульсами.

#### Методики облучения

##### Импульсное электронное облучение (ИЭО)

ИЭО проводилось в КазНТУ им. Сатпаева на ускорителе “Нептун” с ускоряющим напряжением 350 КэВ и плотностью мощности  $6 \cdot 10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup> в двух режимах 1 – однократный импульс с одной стороны, 2 – двукратный импульс с одной стороны.

Основные характеристики импульсного электронного ускорителя “НЕПТУН”: ток пучка электронов  $I = 20$  кА, энергия электронов 500 КэВ, длительность импульса  $\tau = 40$  нс, потребляемая мощность на один выстрел 600 Вт, ток зарядки конденсаторов не более 5 мА питание от сети напряжением 380/220 В, частотой 50 Гц. Давление в ускорительной трубке  $p = 10^{-4}$  тор. Изолирующая среда – очищенная вода с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 81$ .

### Импульсное плазменное облучение (ИПО)

Облучение импульсным плазменным потоком проводилось на импульсном плазменном ускорителе (ИПУ) с коаксиальными электродами «ПП-1». Ускоритель формирует плазменный поток со скоростью  $10-150 \cdot 10^3$  м/с. Длительность воздействия около  $20 \cdot 10^{-6}$  с, концентрация частиц в плазменном потоке варьируется в диапазоне от  $10^{20}$  до  $10^{22}$  м<sup>-3</sup>. При разрядном токе 100-400 кА плотность энергии плазменного потока составляет  $10-150 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>2</sup>. Плотность энергии плазменного потока во время облучения составляла -  $31,25 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>2</sup> режимы облучения аналогичны электронному облучению т.е. одно и двукратный импульсы с одной стороны.

### Нейтронное облучение

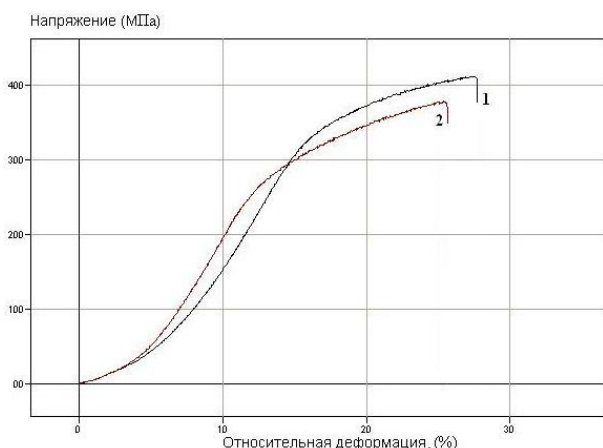
Нейтронное облучение проводилось на реакторе ВВР-К (ИЯФ НЯЦ РК) в канале 5 на отметке центр 3 до флюенсов  $4,2 \cdot 10^{23}$  н/м<sup>2</sup> и  $2,5 \cdot 10^{24}$  н/м<sup>2</sup>.

### Методика механических испытаний

Испытания на одноосное растяжение необлученных и облученных образцов проводили на универсальной испытательной машине «LR5KPlus» при температуре 293К и скорости деформирования 0,5 мм/мин. Управление установкой в процессе испытания осуществляется дистанционно – с помощью компьютера, оборудованным специальным программным обеспечением «NEXYGEN plus», позволяющим настраивать и управлять испытанием, строить графики деформации и производить расчет результатов в режиме реального времени.

Таблица 2. Результаты механических испытаний сплава Д-16 до и после термообработки.

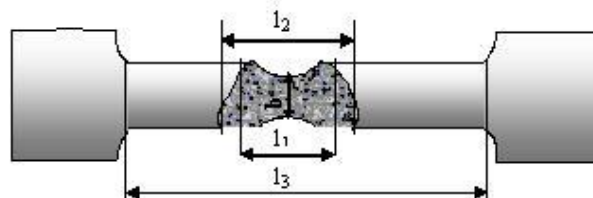
Образец	Предел прочности, $\sigma_B$ (МПа)	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$ (МПа)	Пластичность, $\delta$ (%)
Состояние поставки	412,21	355,01	27,7
Термически обработан	379,12	302,96	25,7



1- образец в состоянии поставки, 2- термически обработанный (гомогенизированный) образец

Рисунок 2. Кривые растяжения алюминиевого сплава Д-16

Испытание образцов подвергнутых воздействию плазмы проводилось на установке «Инстрон-1195» при идентичных условиях. Образцы представляли собой плоскую двойную лопатку с симметричными концентраторами напряжений в области воздействия плазменных потоков. Для сравнения на один из образцов подверженных термообработке наносились идентичные концентраторы напряжений. Испытание этого образца также проводилось на установке «Инстрон-1195».



$l_1$  – область концентраторов напряжений,  $l_2$  – область воздействия потоков плазмы,  $l_3$  – длина рабочей части,  $b$  – поперечное сечение в области концентраторов

Рисунок 1. Вид образца подвергнутого воздействию потоков плазменного сгустка

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### Исследование механических характеристик сплава Д-16 после термообработки

Результаты механических испытаний на одноосное растяжение сплава Д-16 после термообработки на гомогенный твердый раствор приведены в таблице 2, и на рисунке 2.

Из приведенных данных видно, что термообработка приводит к снижению механических характеристик сплава, а именно, предел прочности ( $\sigma_B$ ) уменьшается на 8%, предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) на 14,6%, а пластичность ( $\delta$ ) на 2%. Из показанных на рисунке 1 графиков можно заключить: область упругой деформации несколько изменяется. По сравнению с материалом в состоянии поставки требуется большая нагрузка до одинаковых уровней деформации.

#### Исследование механических характеристик сплава Д-16 после ИПО

Образцы, подвергнутые воздействию плазменного потока, испытывались методом одноосного растяжения на установке «Инстрон-1195». Во время эксперимента снимались показания нагрузки и удлинения. Результаты механических испытаний и кривые деформации представлены в таблице 3.

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ, ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОННОГО  
И ПЛАЗМЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА**

Таблица 3. Результаты испытаний на одноосное растяжение сплава Д-16 до и после воздействия потоками плазмы

Образец	Предел прочности $\sigma_B$ (МПа)	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$ (МПа)	Пластичность, $\delta$ (%)
Исходный	408	122	15,7
ИПО 1 импульс	444	224	15,3
ИПО 2 импульса	490	262	13,4

Из таблицы 3 следует, что в результате воздействия на материал плазменным потоком происходит изменение определяемых механических параметров. Следует отметить, что при однократной ИПО предел прочности увеличивается на 17,1%, предел текучести увеличивается на 8,36%,  $\delta$  уменьшается на 12,3%. При двукратном воздействии предел прочности увеличивается на 29,2%, предел текучести увеличивается на 11,47%, пластичность уменьшается на 10,4%.

Еще одним важным фактом является то, что с увеличением числа импульсов в сплаве также происходят изменения, предел прочности увеличивается на 12,1%, , предел текучести возрастает на 3,11%, в то время как пластичность падает на 1,9% по сравнению со значениями для образца обработанного однократным импульсом. Следовательно, можно отметить, что пластичность в отличие прочности носит немонокотный характер: однократная импульсная обработка приводит к росту пластичности, увеличение кратности импульсов приводит, наоборот, к снижению пластичности.

**Исследование механических характеристик сплава Д-16 после ИЭО**

Механические характеристики, и график деформации, полученные при исследовании материала после импульсного электронного облучения, представлены в таблице 4 и на рисунке 3. Исследование образцов сплава Д-16 подвергнутых импульсному электронному воздействию показало:

- При однократном импульсе предел прочности уменьшается на 3,4%,  $\sigma_{0,2}$  уменьшается на 5,5%, пластичность увеличивается на 7,7%.
- При двукратном воздействии электронным пучком наблюдается увеличение: предела прочности на 7,3%, предела текучести на 4,9%, пластичности на 7,6%

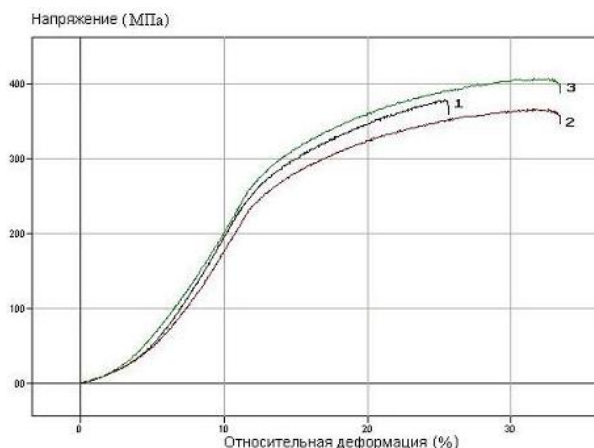
Таблица 4. Результаты испытаний на одноосное растяжение сплава Д-16 до и после ИЭО

Образец	Предел прочности, $\sigma_B$ (МПа)	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$ (МПа)	Пластичность, $\delta$ (%)
Исходный	379,12	302,96	25,7
ИЭО 1 импульс	365,99	286,19	33,4
ИЭО 2 импульса	407,10	317,82	33,3

Таблица 5. Результаты испытаний на одноосное растяжение сплава Д-16 до и после реакторного облучения.

Образец	Предел прочности, $\sigma_B$ (МПа)	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$ (МПа)	Пластичность, $\delta$ (%)
Исходный	379,122	302,96	25,7
Нейтронное $4,2 \cdot 10^{23}$ н/м <sup>2</sup>	414,711	317,15	41,3
Нейтронное $2,5 \cdot 10^{24}$ н/м <sup>2</sup>	421,951	320,95	40,5

- Изменение механических характеристик между однократным и двукратным воздействиями составляет:  $\sigma_B$  увеличение на 3,9%,  $\sigma_{0,2}$  снижение на 0,6%,  $\delta$  уменьшение на 0,1%.



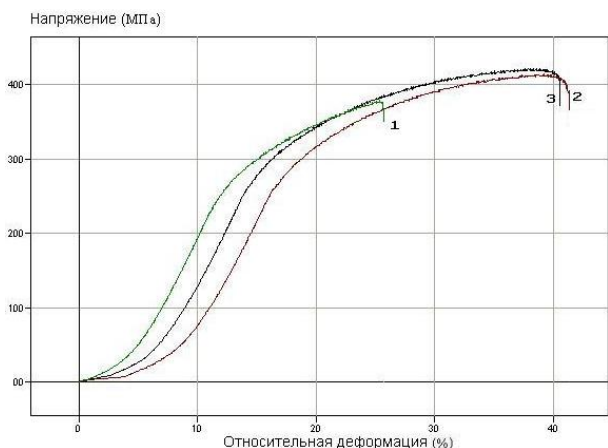
1- исходный образец, 2-образец подвергнутый однократному импульсному электронному воздействию, 3- образец, подвергнутый двукратному импульсному электронному воздействию

Рисунок 3. Кривые растяжения алюминиевого сплава Д-16

**Исследование механических характеристик сплава Д-16 после нейтронного облучения**

Исследования механических свойств образцов сплава Д-16, облученных на реакторе ВВР-К дали следующие значения (таблицу 5 и рисунок 4).

Реакторное облучение сплава Д-16 до флюенса  $4,2 \cdot 10^{23}$  н/м<sup>2</sup> приводит к увеличению механических характеристик:  $\sigma_B$  увеличивается на 9,3%,  $\sigma_{0,2}$  на 4,6%,  $\delta$  на 15,6%. С повышением флюенса до  $2,5 \cdot 10^{24}$  н/м<sup>2</sup>  $\sigma_B$  увеличивается еще на 2%,  $\sigma_{0,2}$  увеличивается на 1,3%,  $\delta$  увеличивается на 0,8%.



1- исходный образец, 2-образец подвергнутый реакторному облучению флюенс  $4,2 \cdot 10^{23}$  н/м<sup>2</sup>, 3- образец подвергнутый реакторному облучению флюенс  $2,5 \cdot 10^{24}$  н/м<sup>2</sup>

Рисунок 4. Кривые растяжения алюминий-магний-марганцевого сплава Д-16

Следует отметить, что в отличие от плазменного импульсного облучения изменения прочностных свойств имеют монотонный характер: с увеличением флюенса в указанном интервале, значения пределов прочности, текучести и пластичность монотонно возрастают. На диаграмме растяжения заметно увеличение области пластической деформации, и изменения скорости набора деформации, в области отвечающей за упругие свойства материала.

#### Сравнительный анализ механических характеристик сплава Д-16 подвергнутого различным видам радиационной обработки

Сопоставление результатов механических испытаний после выбранных видов воздействий на исследуемый материал приведено на рисунке 5. На этом рисунке показано процентное соотношение изменений  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$  и  $\delta$  в зависимости от типов облучения, кратности импульсов для ИПО и ИЭО и дозы нейтронного облучения.

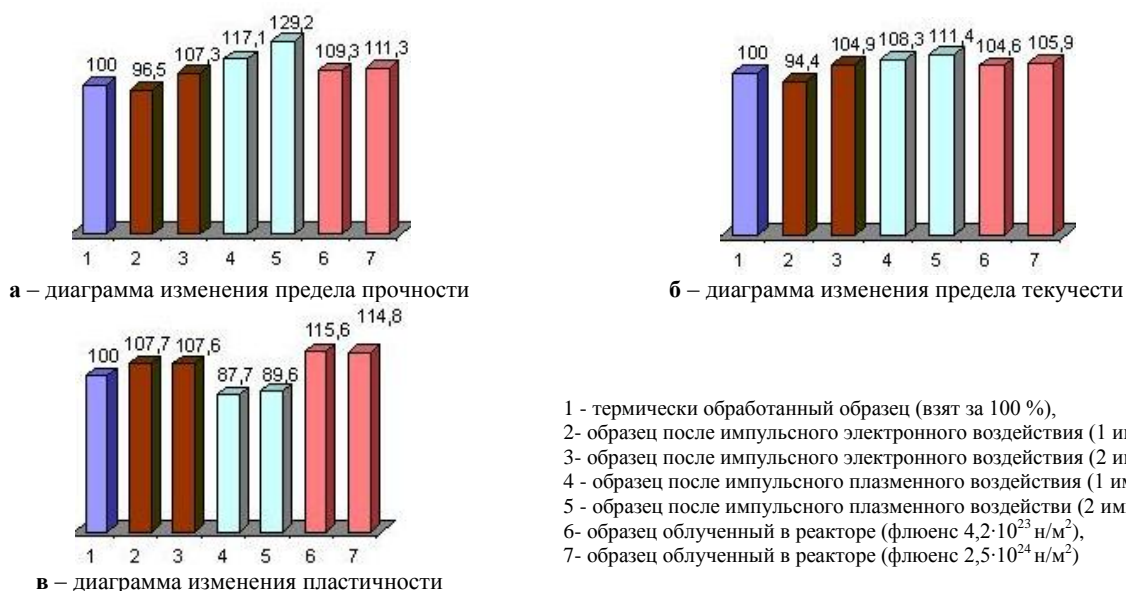


Рисунок 5. Диаграммы изменения механических характеристик алюминий-магний-марганцевого сплава Д-16

Из сравнения зависимостей можно сделать следующие выводы:

- Наиболее эффективным методом повышения прочностных свойств материала является импульсная плазменная обработка.
- Реакторное облучение, по сравнению с другими используемыми в данной работе методами радиационной обработки приводит к наибольшему повышению пластичности данного сплава.

#### Выводы

По результатам проведенных исследований можно заключить:

1. Все исследованные в данной работе виды радиационной обработки ИПО, ИЭО, реакторное облучение приводят к повышению прочностных свойств сплава Д-16.

2. Импульсная плазменная обработка сплава Д-16 приводит к наибольшему увеличению прочностных свойств ( $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_B$ ) по сравнению с импульсной электронной обработкой и нейтронным облучением.
3. Реакторное облучение и импульсная электронная обработка приводят к увеличению пластичности материала, в то время как импульсная плазменная обработка приводит к снижению пластичности материала.



**ЛИТЕРАТУРА**

1. Кадыржанов, К.К. Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов. / Ф.Ф. Комаров, А.Д. Погребняк, В.С.Русаков, Т.Э.Туркебаев. - М: Изд. МГУ, 2005 – 640 с.

**НЕЙТРОНДЫ СӘУЛЕЛЕУДІҢ, ЭЛЕКТРОНДЫ ЖӘНЕ ПЛАЗМАЛЫ ИМПУЛЬСТЫҚ ӘСЕРІМЕН  
АЛЮМИНИЙ ҚОСПАСЫНЫҢ МЕХАНИКАЛЫҚ СИПАТЫНА ӘРЕКЕТІН ЗЕРТТЕУ**

**Диков А.С., Ермаков Е.Л., Кислицин С.Б., Полтавцева В.П.**

*ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан*

Бірестік созу арқылы механикалық сынау әдісімен электронды импульстық, плазмалы импульстық және де нейтронды сәулеленудің Д-16 алюминий қоспасының физика-механикалық құрамының өзгерісіне әсері зерттелген. Зерттеу нәтижесінде оның қаттылық шегі, тұтқырлығы және майысқыштығы анықталды. Алынған анализ нәтижелері басқа зерттеу нәтижелерімен салыстырылды.

**INFLUENCE OF NEUTRON IRRADIATION, PULSED ELECTRON AND PULSED  
PLASMA TREATMENT ON MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOY**

**A.S. Dikov, E.L. Ermakov, S.B. Kislitsin, V.P. Poltavtseva**

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

Influence of pulsed electron and pulsed plasma treatment as well as neutron irradiation on mechanical properties changes of aluminum alloy D-16 was investigated. Yield strength ( $\sigma_{0,2}$ ), ultimate strength ( $\sigma_B$ ) and plasticity ( $\delta$ ) of material was determined by the uniaxial mechanical test method. Comparative analysis of mechanical properties changes shows that pulsed plasma treatment leads to most significant growth of strength (both  $\sigma_{0,2}$  and  $\sigma_B$ ) compare to pulsed electron treatment and neutron irradiation. Plasticity D-16 alloy decrease after pulsed plasma treatment while pulsed electron treatment and neutron irradiation leads to increase of plasticity.



УДК: 539.12.04; 539.21

## ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ОБЛУЧЕННЫХ И НЕОБЛУЧЕННЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА И АЛЮМИНИЯ МЕТОДОМ РЕНГЕНОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА

Алдабергенова Т.М., Слюсарев А.П., Коспанов Н., Кислицин С.Б.

*Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан*

Методом рентгеновской дифрактометрии исследовано формирование фаз в нержавеющей стали 12Х18Н10Т при имплантации низкоэнергетичных ионов кислорода и последующем отжиге. Показано, что имплантация кислородом до флюенса  $2 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup> и постимплантационные отжики не приводят к формированию оксидов в приповерхностной области.

Исследовано влияние температурной обработки импульсного плазменного воздействия на структуру алюминиевого сплава Д-16. Показано, что термическая обработка на гомогенный твердый раствор приводит к формированию ГЦК-твердого раствора и включений Al(Fe,Mn)Cu<sub>2</sub> фазы, содержащейся в небольшом количестве. Импульсная плазменная обработка не изменяет фазового состава сплава.

### ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что в последние годы появился ряд новых методов исследования структуры и свойств материалов см. [1], рентгеноструктурный анализ является одним из основных методов определения структуры кристаллических материалов и изучения влияния различных факторов (облучения, температуры и др.) на изменение структурно-фазового состава. В данной работе рентгенофазовый анализ применен к задачам исследования влияния различного вида облучения (имплантация тяжелых ионов, импульсное плазменное облучение) на структуру нержавеющей стали 12Х18Н10Т и сплава на основе алюминия Д-16.

Первой задачей данной работы являются исследования влияния импульсной плазменной обработки на структурно-фазовое состояние промышленного алюминиевого сплава Д-16. Структурно-фазовые перестройки, вызванные радиационным воздействием в значительной степени определяют изменение свойств материала и зная эффект воздействия определенного вида воздействия можно прогнозировать изменение его механических характеристик.

Второй задачей является исследование формирования подповерхностных барьерных слоев в стали, создаваемых методом низкоэнергетичной ионной имплантации. Возможность создания таких подповерхностных слоев, препятствующих миграции вглубь материала нанесенных на поверхность покрытий, была ранее продемонстрирована для системы железо (основной материал) – бериллий (покрытие) [6]. В данной работе предприняты исследования по созданию подповерхностных барьерных слоев в стали 12Х18Н10Т, создаваемых низкоэнергетической имплантацией ионов кислорода.

### МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ

#### Материалы и подготовка образцов для исследований

##### *Сталь 12Х18Н10Т*

Первым этапом подготовки образцов была разделка исходной массивной пластины на образцы с габаритными размерами  $20 \times 20 \times 1$  мм<sup>3</sup>. В процессе механической и электроэрозионной резки поверхность образцов подвергается наклепу, что может существенно изменить его структуру и механические свойства. Поэтому следующим этапом была механическая шлифовка и полировка для снятия модифицированного при резке слоя толщиной ~ 20 мкм. Далее электролитической полировкой окончательно устранялся слой наклепа на поверхности. Последним этапом был гомогенизирующий отжиг при температуре 850°С в течение двух часов.

Имплантация ионов кислорода проводилась на низкоэнергетическом канале (ЭЦР источник) ускорителя DC-60. Образец №1 был облучен до дозы  $1 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>, энергия ионов кислорода составила 100 КэВ, площадь облучения - 1 см<sup>2</sup>, температура образцов при облучении не превышала 150°С. Образец №2 был облучен до дозы  $2 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>, при тех же энергиях, площади облучения и температуре, что и образец №1.

##### *Алюминиевый сплав Д-16*

Образцы для исследований изготавливали в виде пластины размерами  $20 \times 4 \times 1$  мм<sup>3</sup> из ленты промышленного сплава. элементный состав которого следующий: Mg - 1,5 вес. %, Cu - 4.7 вес. %, основа - Al. Перед испытаниями образцы подвергали термообработке на гомогенный твердый раствор, включающей отжиг при 500°С в течение 1 ч с последующей закалкой в воде, затем воздействию импульсного плазменного облучения. Обработка импульсным плазменным пучком проведена на коаксиальном плазменном ускорителе (КазНУ им Аль-Фараби, г. Алматы).

### Методы исследований

Исследование изменений фазового состава и структуры нержавеющей стали 12X18H10T выполнено методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре D8 ADVANCE в стандартном режиме с использованием медного излучения и графитового монохроматора на дифрагированном пучке. На основе анализа дифрактограмм определялись фазовый состав и параметры РСА, такие как параметр кристаллической решетки  $a$ ; размер кристаллитов  $L$  (как среднее арифметическое по рентгеновским линиям (111) и (200)), условная степень текстурированности (как отношение интенсивностей линий (200) и (111)). Размер кристаллитов по отдельной рентгеновской линии оценивался по формуле  $L=0,9\lambda/(B-\nu)\cos\Theta$ , где  $B$  и  $\nu$  – экспериментальное и приборное уширение рентгеновской линии,  $\Theta$  – ее угловое положение [2]. В качестве стандарта принимались параметры РСА чистого алюминия.

В отдельных случаях для определения глубины залегания кислорода в имплантированной кислородом стали использовался метод Резерфордского обратного рассеяния на протонах. Эти исследования выполнялись сотрудниками аналитической группы ускорителя УКП-2-1 ИЯФ НЯЦ РК.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

#### Формирование фаз в нержавеющей стали 12X18H10T при имплантации низкоэнергетичными ионами кислорода и последующем отжиге

##### Имплантация ионами кислорода

В исходном образце стали (после механической и электролитической полировки) присутствуют три фазы, рисунок 1. Основной фазой является фаза аустенитного типа, рентгенометрические параметры которой близки к фазе состава X19H11Fe70. Параметр кристаллической решетки аустенитной фазы равен:  $a=3.5904\pm 0,0006$  Å. Аустенит находится в неравновесном состоянии со значительным перераспределением интенсивностей рефлексов дифракции от кристаллических плоскостей анализируемой фазы относительно эталонных данных для ГЦК.

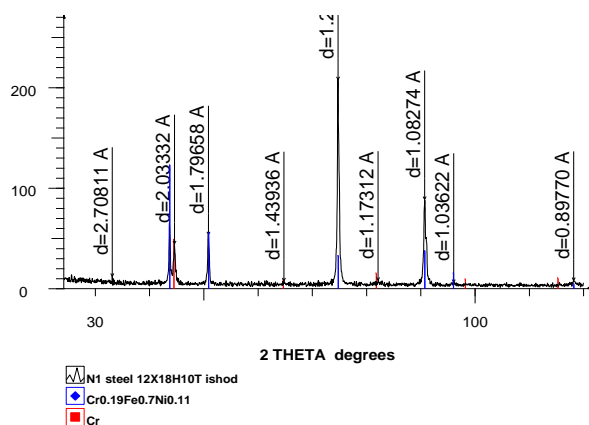


Рисунок 1. Дифрактограмма исходного образца нержавеющей стали 12X18H10T

Второй фазой является хром, представленный на дифрактограмме тремя линиями с параметром решетки  $a=2.8752\pm 0,0011$  Å. Третьей фазой является оксид железа –  $Fe_2O_3$ , который присутствует в виде следов и является оксидной пленкой на поверхности образца.

#### Распределение концентрации кислорода по глубине и фазовая структура стали после имплантации ионов кислорода

Распределение концентраций и сформировавшаяся при имплантации фазовая структура изучались методами Резерфордского обратного рассеяния (РОР) на протонах и рентгенофазовым анализом в двух геометриях – Брега-Брентано и скользящим пучком рентгеновских лучей (грейзинг).

РОР исследования распределения концентрации имплантированного кислорода по глубине образцов стали облученных до доз  $1\cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup> (образец №1) и  $2\cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup> (образец №2) после имплантации были выполнены на ускорителе УКП-2-1. Энергия протонного пучка составляла 1 МэВ.

В результате обработки РОР спектров было получено следующее распределение концентрации кислорода по глубине: практически весь кислород сосредоточен в приповерхностном слое ~ 550 нм. Концентрация кислорода от поверхности до 400 нм практически постоянна, далее концентрация кислорода уменьшается по мере увеличения расстояния от облученной поверхности образца. Результат обработки спектров показаны на рисунке 2а, б.

Следует отметить, что концентрационные профили имплантированного кислорода как при флюенсе  $1\cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup> (образец №1), так и при флюенсе  $2\cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup> (образец №2) близки, т.к. энергия ионов в обоих случаях одинакова, следовательно и пробег также одинаков. Поскольку интенсивность облучения в для образцов №1 и №2 одинакова, то различие в облучении образцов №1 и №2 состояло только в увеличении времени облучения в два раза. Так как при облучении стали, ионами кислорода наблюдается сильное распыление поверхности, то в случае образца №2 большее количество материала образца подверглось распылению. Результатом этого наблюдается некоторое уменьшение концентрации кислорода в образце №2, несмотря на более высокий флюенс.

Рентгенофазовый анализ в геометрии Брега-Брентано (рисунок 3) дал следующие результаты: на дифрактограммах образцов с флюенсом и  $1\cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup> и  $2\cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup> со стороны имплантированного кислорода наблюдаются рефлексы соответствующие аустениту и хрому, также как и в необлученном образце. Т.е. образцы № 1 и № 2 имеют двухфазную структуру. В образце № 1 основная фаза – аустенит с параметром решетки  $a = 3.5938\pm 0,0008$  Å, вторая фаза – хром с параметром решетки  $a = 2,8744\pm 0,0013$  Å. В образце № 2 параметр решетки аустенита равен  $a=3,5919\pm 0,0006$ Å, хром определяется по одной линии, с параметром решетки  $a = 2,8748\pm 0,0031$  Å.



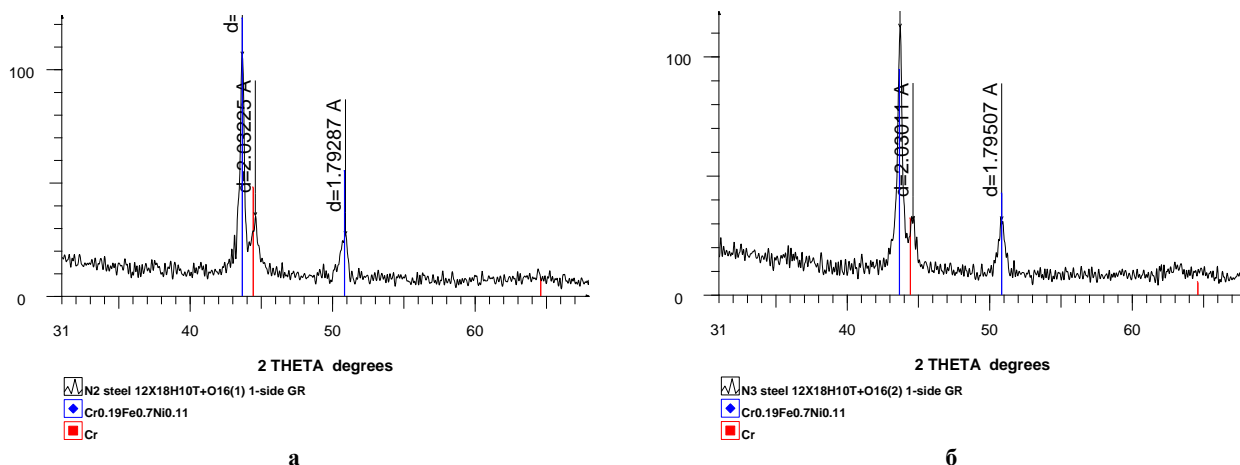


Рисунок 5. Дифрактограммы поверхностей имплантированных кислородом образцов №1 (а) и №2 (б), полученные при съемке в геометрии скользящего пучка

Рентгенофазовый анализ облученных поверхностей образцов стали 12X18H10T № 1 и № 2, облученных кислородом до флюенсов  $1 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup> и  $2 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>, выполненный по данным съемки в геометрии скользящего пучка новой информации не дал (рисунок 5).

По данным «грейзинга» структура поверхности образца №1 двухфазная: аустенит с параметром решетки  $a=3,5873 \pm 0,002$  Å и хром с параметром решетки  $a=2,8739 \pm 0,0031$  Å. Структура поверхности образца №2 также двухфазная: аустенит с параметром решетки  $a=3,5882 \pm 0,002$  Å, хром с параметром решетки  $a=2,8708 \pm 0,0031$  Å. Т.е. рентгенофазовый анализ при съемке как в геометрии Брегга-Брентано, так и в геометрии скользящего пучка дал одинаковые результаты и не показал формирования оксидных фаз в имплантированной кислородом стали вплоть до флюенсов  $2 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>. Причиной этого может быть недостаточная концентрация кислорода в области имплантации, для того чтобы сформировать оксидные фазы железа, хрома или никеля, или недостаточная чувствительность методов исследования – количество образовавшейся оксидной фазы недостаточно для регистрации методами рентгенофазового анализа. В результате этого, существенных различий в структуре облученных и необлученных кислородом поверхностей образцов стали не наблюдается. Изменения параметра решетки аустенита и хрома говорит, по-видимому, о том, что кислород находится в состоянии твердого раствора в решетке хрома и аустенита, чем и вызвано изменение параметра решетки этих фаз.

По результатам проведенных экспериментов можно сделать следующий вывод: имплантация кислорода с энергией ионов равной 100 КэВ не приводит к формированию в приповерхностной области оксидного слоя, способного выполнять функцию диффузионного барьера.

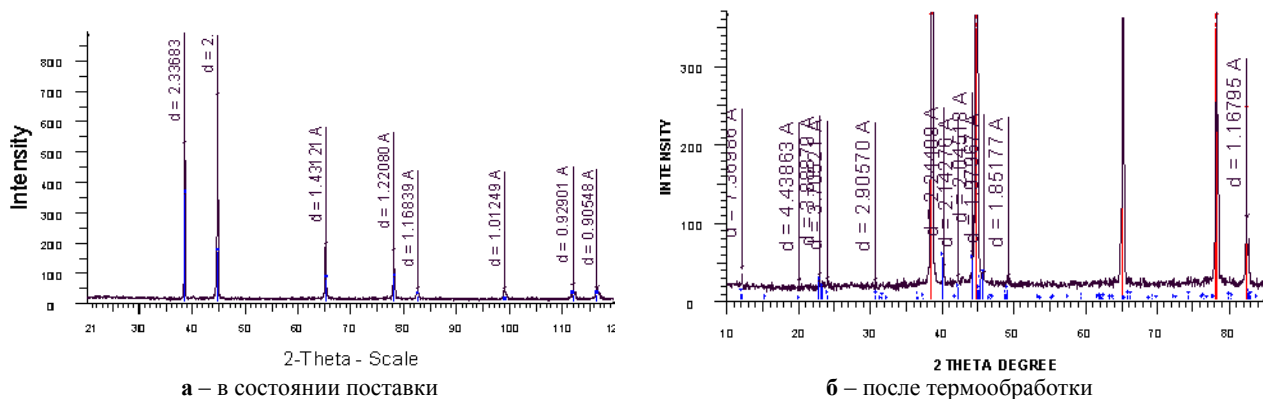
### Влияние импульсной плазменной обработки на изменение структурно-фазового состояния алюминиевого сплава Д-16

#### Структура алюминиевого сплава Д16 после импульсной плазменной обработки

Сплав Д16 в состоянии поставки представляет собой ГЦК–твердый раствор на основе алюминия с текстурой по плоскости (200), рисунок 6а. Наличие текстуры является рентгеноструктурным признаком повышенной концентрации атомов Си и Mg в плоскости (200). В термически обработанном сплаве (отжиг в течение часа при  $T = 500^\circ\text{C}$  и закалка в воду) кроме ГЦК–твердого раствора присутствует соединение, близкое по составу к соединению  $\text{Al}(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Cu}_2$  (S-фаза) в количестве чуть превышающим порог чувствительности данного метода (рисунок 6б). Кроме того, наблюдается уменьшение параметров РСА относительно сплава в состоянии поставки, что свидетельствует об очищении твердого раствора и выносе примесей на границы зерен.

#### Структура алюминиевого сплава Д16 после импульсной плазменной обработки

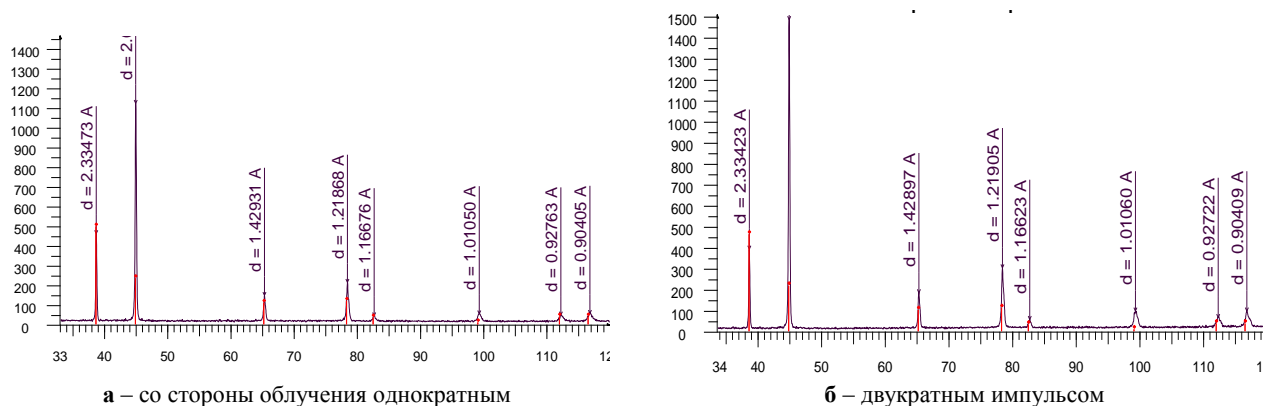
Рентгеноструктурный анализ облученной поверхности не показал изменения фазового состава, но наблюдается текстурированность облученной поверхности (рисунок 7). В результате однократного плазменного облучения степень текстурированности составляет 2.44 (относительно линий (200) и (111)), тогда как с обратной стороны образца степень текстурированности в два раза меньше и составляет 1.21. параметры решетки также изменяются незначительно:  $a = 4.0428 \pm 0.0002$  Å со стороны облучения и  $4.0471 \pm 0.0002$  Å с противоположной стороны. В результате двукратного облучения степень текстурированности возрастает и составляет 3,79 и 1,88 со стороны облучения и с обратной стороны соответственно.



а – в состоянии поставки

б – после термообработки

Рисунок 6. Диффрактограммы сплава Д16 в состоянии поставки и после термообработки



а – со стороны облучения однократным

б – двукратным импульсом

Рисунок 7. Диффрактограммы сплава Д16

## Выводы

По результатам проведенных исследований можно заключить:

1. Имплантация кислорода с энергией ионов равной 100 КэВ не приводит к формированию в приповерхностной области оксидного слоя, способного выполнять функцию диффузионного барьера.
2. В сплаве Д16 в состоянии поставки установлено присутствие только ГЦК–твердого раствора на основе алюминия с текстурой по плоскости (200). В термически обработанном сплаве (отжиг 500°C в те-

чение часа и закалка в воду) обнаружено присутствие, помимо ГЦК–твердого раствора, соединения, близкого по составу к соединению  $Al(Fe,Mn)Cu_2$  в очень небольшом количестве.

3. Фазовый состав обработанного импульсным плазменным пучком сплава Д16 не изменяется и представляет собой ГЦК–твердый раствор на основе алюминия. Выявлено уменьшение параметра решетки и размера кристаллитов для обработанной плазменным пучком поверхности и увеличение степени текстурированности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Косенков, В.М. Рентгенография в реакторном материаловедении/ В.М. Косенков. - Изд. Второе. Ульяновск: УлГУ, 2006.-168с.
2. Кулманен, Э.В. /Рентгенография. Учебное пособие / Э.В.Кулманен.- Алматы: КазНТУ, 2006.-304с.
3. Полтавцева, В.П. Исследование структурно-фазового состояния алюминиевого сплава Д16 после механических испытаний при различных температурах/ В.П.Полтавцева, Е.Л.Ермаков, С.Б.Кислицин // Вестник НЯЦ РК. -2006.- Вып. 4.- С.37-42.
4. Полтавцева, В.П. Влияние температуры и напряжений в условиях ползучести на распределение фаз в алюминиевом сплаве Д16 / В.П. Полтавцева, Е.Л.Ермаков, С.Б.Кислицин.// Материалы 6-ой международной конференции «Ядерная и радиационная физика». Алматы: ИЯФ НЯЦ РК.- 2007.- С. 238-239.
5. Полтавцева, В.П. Влияние плазменной обработки на структуру и свойства алюминиевого сплава Д16. / В.П.Полтавцева, Е.Л.Ермаков, С.Б.Кислицин, А.П Горцев. // Ядерная и радиационная физика. Т.2. Радиационная физика. Алматы: ИЯФ НЯЦ РК. - 2008.-С. 98-102.
6. Nurkenov, S.A. Thermally induced processes in lamellar system iron-beryllium in the presence of implanted oxygen ions./ S.A. Nurkenov, S.B. Kislitsin, V.S. Rusakov, K.K. Kadyrzhanov. // Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана. -2008 г.- №2 (62).- С. 122-130.

**ТЕМІР ЖӘНЕ АЛЮМИНИЙ НЕГІЗІНДЕГІ СӘУЛЕЛЕНДІРІЛГЕН ЖӘНЕ СӘУЛЕЛЕНДІРІЛМЕГЕН  
ҚОРЫТПАЛАРДЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫН РЕНТГЕНҚҰРЫЛЫМДЫҚ ТАЛДАУ ӘДІСІМЕН ЗЕРТТЕП БІЛУ**

**Алдабергенова Т.М., Слюсарев А.П., Коспанов Н., Кислицин С.Б.**

*ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан*

Оттегі төменгі энергиялық иондарының тоттанбайтын болатқа енгізілген әсері және күйдірілгеннен кейінгі қалыптасқаны рентгенқұрылымдық әдісімен фазалардың пайда болуы анықталған.  $2 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup> флюенске дейін оттегінің тоттанбайтын болатқа енгізілген және енгізілгеннен кейінгі, күйдірілген оксидтің қабаттың беттікке таяу салада қалыптасуына әкелмейді.

Импульстік плазмалық жылумен өңделген алюминий қорытпасы Д-16 зерттелген. Көрсетілгендей жылумен өңделген гомогендік қатты ертінді қалыптасуға әкеледі ЖОК қатты ертіндіден басқа және Al(Fe,Mn)Cu<sub>2</sub> қосылысына жақын келетін, қосылыстар өте көп емес мөлшерде бар болатыны табылған. Импульстік плазмалық шокпен өңделгенде қорытпаның фазалық құрамы өзгермейді.

**X-RAY INVESTIGATION OF STRUCTURE OF IRRADIATED  
AND NOT IRRADIATED ALLOYS ON THE BASE OF IRON AND ALUMINUM**

**T.M. Aldabergenova, A.P. Slyusarev, N. Kospanov, S.B. Kisliitsin**

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

By the method of roentgen diffractometry investigates formation of phases in stainless steel 12X18H10T at implantation low energy ions of oxygen and at the subsequent annealing. It is shown, that implantation by oxygen up to fluencies  $2 \cdot 10^{18}$  ions/ cm<sup>2</sup> and post implantation annealing do not result in formation oxides in surface area.

Influence of thermal treatment and plasma impact on structure of aluminum alloy D-16 is investigated. It is shown, that thermal treatment results in formation of the FCC - solid solution and small amount of inclusions of Al(Fe,Mn)Cu<sub>2</sub> phase. Pulse plasma treatment does not change phase structure of the alloy.



УДК 621.039.5

## СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РЕАКТОРА ВВР-К

Шаймерденов А.А.

*Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан*

Для расчетного сопровождения предстоящих испытаний опытных ТВС с низкообогащенным топливом на реакторе ВВР-К, созданы расчетные модели с использованием компьютерного кода MCNP, воспроизводящие конфигурацию активной зоны как с водяным, так и с бериллиевым отражателем нейтронов.

С целью тестирования расчетных моделей на критическом стенде проведены модельные эксперименты с макетом облучательного устройства для размещения трех опытных ТВС в центре активной зоны. Измерялись распределения плотности потока тепловых нейтронов по высоте и азимуту ТВС.

Хорошее согласие между расчетными и экспериментально полученными распределениями плотности потока нейтронов по высоте и азимуту ТВС, а также эффективностями органов регулирования говорит в пользу созданной расчетной модели.

### ОПИСАНИЕ РЕАКТОРА ВВР-К

Исследовательский реактор ВВР-К представляет собой гетерогенный реактор на тепловых нейтронах, бакового типа. Замедлителем, теплоносителем и отражателем служит обессоленная вода [1].



Рисунок 1. Реактор ВВР-К

В качестве штатных ТВС в активной зоне реакторе ВВР-К используются трубчатые, шестигранного сечения ТВС типа ВВР-Ц: ТВС 1-го типа и ТВС 2-го типа (рисунки 2 и 3). Трехтрубные ТВС 2-го типа используются для размещения рабочих органов системы управления и защиты. Топливный материал - диоксид урана, диспергированный в алюминиевой матрице. Покрытие из алюминиевого сплава САВ-1.

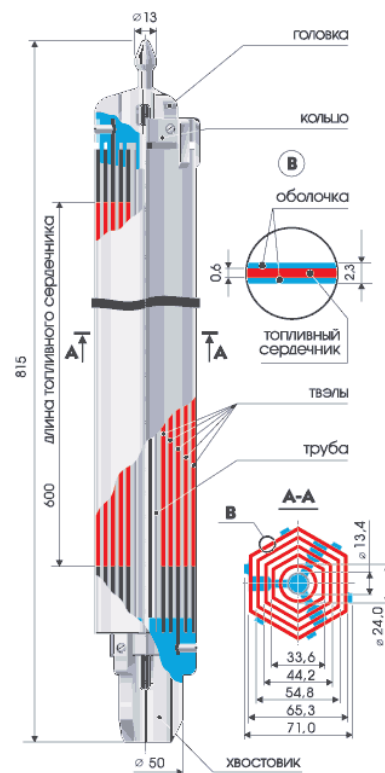
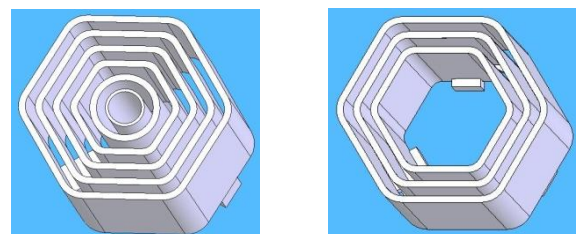


Рисунок 2. ТВС типа ВВР-Ц



а – ТВС 1<sup>го</sup> типа

б – ТВС 2<sup>го</sup> типа

Рисунок 3. Сечение ТВС типа ВВР-Ц



### ОПИСАНИЕ КРИТИЧЕСКОГО СТЕНДА

Критический стенд (КС) представляет собой реактор на тепловых нейтронах с легководным замедлителем и комбинированным отражателем (вода, бериллий). Разрешенная мощность 100 Вт. КС расположен в одной из отстойных камер реактора ВВР-К, снабженных мощной биологической защитой. Критический стенд предназначен для исследований нейтронно-физических характеристик активных зон (а.з.) водо-водяных реакторов класса ВВР и некоторых элементов а.з. реакторов других типов, а также для формирования условий испытаний различных петлевых каналов. Максимальная плотность потока тепловых нейтронов, достигаемая в облучательных каналах, составляет  $\sim 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

### СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ

В настоящей работе рассматриваются различные конфигурации активной зоны со штатными ТВС реактора ВВР-К. Расчеты выполнены с помощью кода MCNP, предназначенного для расчета основных реакторных функционалов в трехмерной геометрии (метод Монте-Карло) [2, 3].

Созданы различные расчетные модели твэла и ТВС типа ВВР-Ц: модель гомогенного твэла, в которой материалы оболочки и топливного сердечника гомогенизировались в пределах геометрических размеров твэла; гетерогенная модель, в которой сердечник и оболочка для каждого твэла были описаны явным образом; а также модель гомогенной ТВС, в которой в границах ячейки а.з. гомогенизировались твэлы (топливо и оболочка) и слой теплоносителя.

Таблица 1. Значение запаса реактивности (%ΔK/K) для различных моделей твэла и ТВС

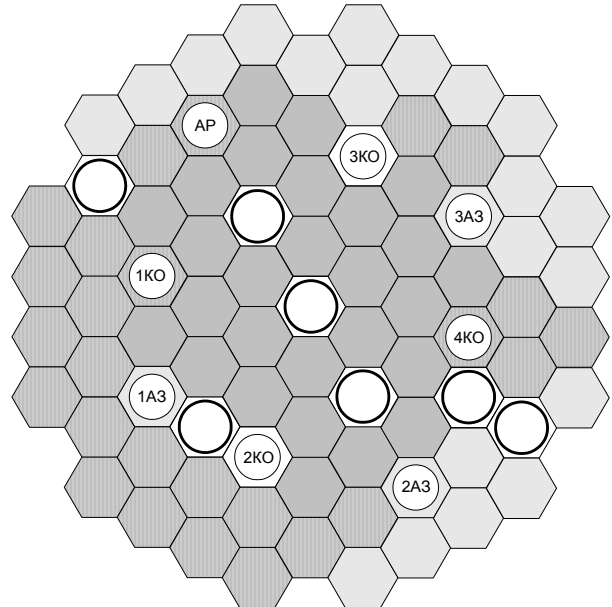
Конфигурация активной зоны	Расчет			Эксперимент
	Гетерогенная ТВС		Гомогенная ТВС	
	Гетерогенный твэл	Гомогенный твэл		
27 ТВС 1 <sup>го</sup> типа, 6 ТВС 2 <sup>го</sup> типа	-0,78±0,03	0,07±0,02	0,50±0,03	0,09±0,03

Из результатов тестового расчета видно, что наилучшее совпадение с экспериментом дает модель гетерогенной ТВС с гомогенным твэлом. Анализ паспортных данных ТВС тоже говорит в пользу этой модели, так как разброс значений массовой плотности урана в твэлах, судя по паспортным значениям масс и длин активной части твэлов, весьма велик. Мы гомогенизируем материал оболочки и топливного сердечника и рассчитываем усредненную по суммарному объему твэлов загруженных в а.з. ТВС плотность урана (которая участвует в расчетах), исходя из реальной загрузки массы урана для каждой конфигурации а.з.

### ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА КРИТИЧЕСКОМ СТЕНДЕ

В рамках программы перевода реактора ВВР-К на топливо с ураном низкого обогащения (УНО) на критическом стенде (КС) проводятся эксперименты с целью исследования нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора ВВР-К с макетом

Проведен тестовый расчет для созданных моделей с конфигурацией активной зоны критического стенда, представленной на рисунке 4. Результаты данного расчета приведены в таблице 1.



27 ТВС 1-го типа и 6 ТВС 2-го типа

Рисунок 4. Картограмма загрузки активной зоны критического стенда

облучательного устройства для размещения опытных ТВС в активной зоне во время их реакторных испытаний с различными боковыми отражателями (вода, бериллий). Результаты этих экспериментов использовались для тестирования и верификации расчетных компьютерных моделей.

Макет облучательного устройства (рисунок 5) размещается в центре активной зоны вместо 7 штатных ТВС. Макет представляет собой вытеснитель, в котором можно установить три ТВС.

Ниже приводятся результаты нейтронно-физического расчета активной зоны критического стенда, полученные с использованием компьютерного кода MCNP для различных конфигураций активной зоны, вместе с соответствующими экспериментальными значениями.

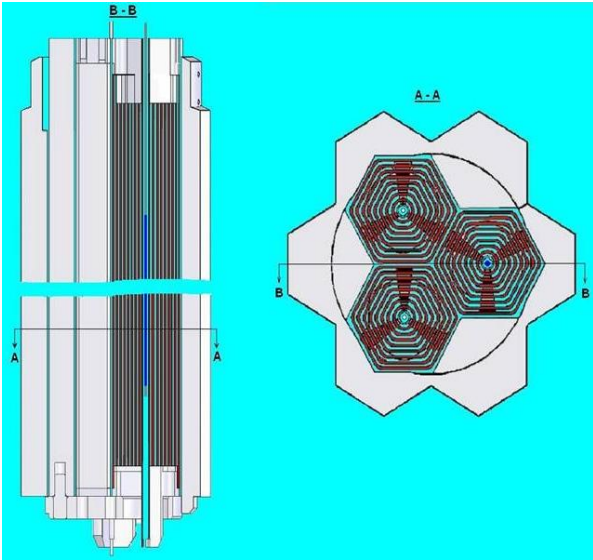
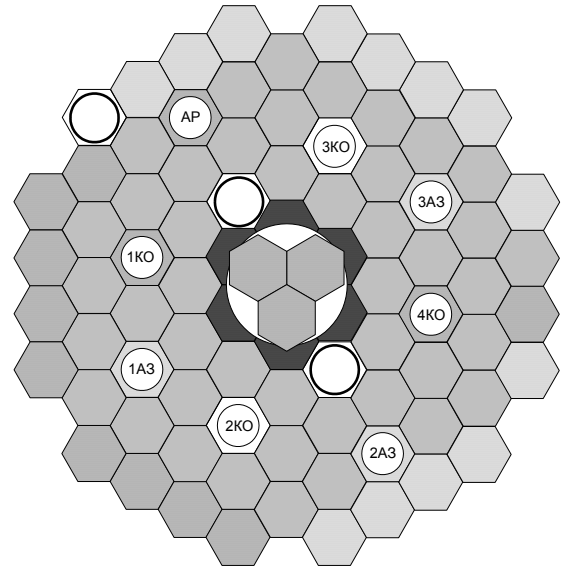


Рисунок 5. Схема облучательного устройства

Рисунок 6. Картограмма загрузки а.з.  
КС 44 ТВС 1<sup>го</sup> типа, 6 ТВС 2<sup>го</sup> типаТаблица 2. Значение  $\rho$  (%ΔК/К) для разных конфигураций активной зоны критического стэнда

№	Конфигурация активной зоны	Расчет	Эксперимент	Примечание
1	44 ТВС 1 <sup>го</sup> типа, 6 ТВС 2 <sup>го</sup> типа	0,17±0,03	0,16±0,04	Рисунок 6
2	(34+3) ТВС 1 <sup>го</sup> типа, 6 ТВС 2 <sup>го</sup> типа	2,03±0,03	2,3±0,3	Рисунок 7
3	(36+3) ТВС 1 <sup>го</sup> типа, 6 ТВС 2 <sup>го</sup> типа	3,00±0,04	3,3±0,4	Рисунок 8

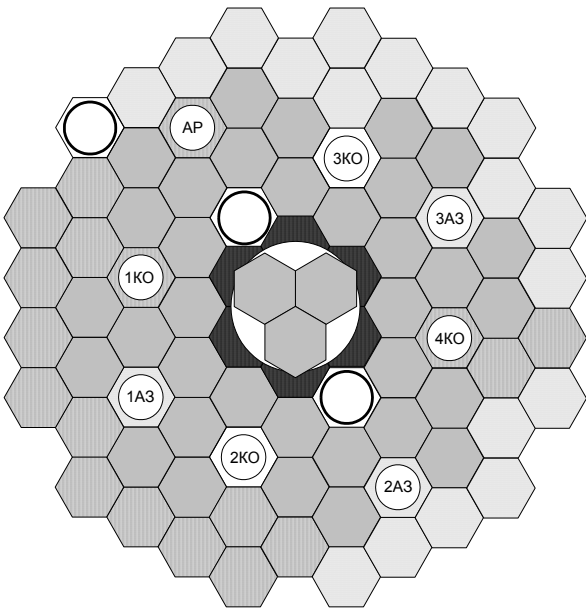
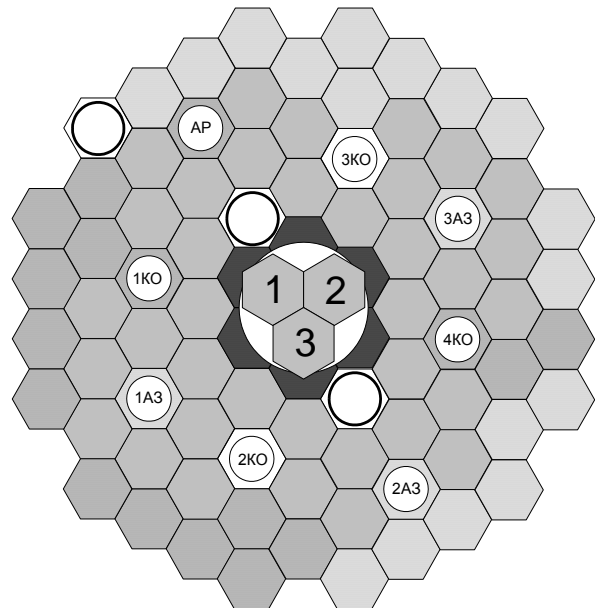
Рисунок 7. Картограмма загрузки а.з.  
КС (34+3) ТВС 1<sup>го</sup> типа, 6 ТВС 2<sup>го</sup> типаРисунок 8. Картограмма загрузки а.з.  
КС (36+3) ТВС 1<sup>го</sup> типа, 6 ТВС 2<sup>го</sup> типа

Таблица 3. Эффективность РО СУЗ, %ΔК/К

РО СУЗ	AP	1КО	2КО	3КО	4КО	1АЗ	2АЗ	3АЗ
Эксперимент	0,19	1,46	2,39	2,10	1,70	1,14	0,82	1,16
Расчет	0,20	1,28	1,91	1,83	1,48	1,17	0,80	1,25

Для загрузки а.з. КС 49 ТВС 1-го типа и 6 ТВС 2-го типа была проведена градуировка рабочих органов (РО) системы управления и защиты (СУЗ), их эффективности представлены в таблице 3.

Оценены величины «стат.весов» центральных ТВС для загрузки активной зоны критического стенда 36 ТВС 1-го типа, 6 ТВС 2-го типа и центрального вытеснителя с тремя ТВС 1-го типа. Результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4. «Стат. веса» ТВС в облучательном устройстве, %ΔК/К

№ положения	Расчет	Эксперимент
1	2,68±0,03	3,0±0,4
2	2,61±0,03	2,8±0,3
3	2,66±0,04	3,1±0,4

Исследовано относительное пространственное распределение плотности потока тепловых нейтронов. Для измерений использовались активационные детекторы из диспрозия.

Измерено также распределение плотности потока тепловых нейтронов по высоте центральной ТВС в

положении 1 (направление на ТВС в положении 2). Результаты измерений представлены на рисунке 9.

Исследовано распределение плотности потока тепловых нейтронов по шести граням центрально-го ТВС в положении 1. Результаты представлены в таблице 5.

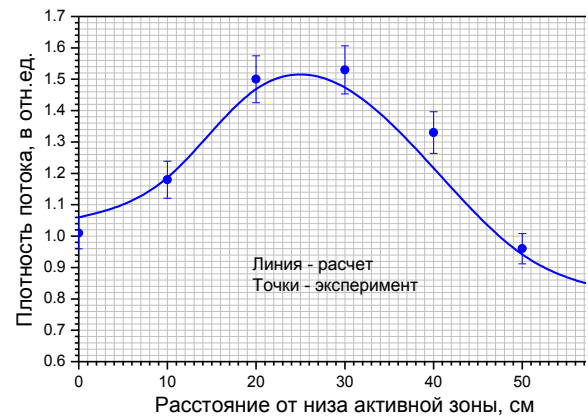


Рисунок 9. Распределение плотности потока тепловых нейтронов по высоте ТВС

Таблица 5. Азимутальное распределение плотности потока тепловых нейтронов в центральной ТВС I

направление	ТВС-2	яч. 11-10	яч. 9-10	яч. 8-8	яч. 8-7	ТВС-3
эксперимент	1,0	1,21	1,01	1,05	1,11	1,02
расчет	1,0	1,25	1,07	0,96	1,22	0,99

Разработана рабочая программа экспериментов на критическом стенде по замене водяного бокового отражателя на бериллиевый, которая определяла последовательность замены ТВС на блоки бериллия (рисунок 10).

В таблице 6 приведены некоторые результаты по оценкам запаса реактивности и «веса» бериллиевых блоков в периферийных ячейках активной зоны критического стенда.

В результате была сформирована конфигурация активной зоны из 22 ТВС 1<sup>го</sup> типа, 6 ТВС 2<sup>го</sup> типа, центрального вытеснителя с тремя ТВС 1<sup>го</sup> типа и бокового отражателя из 26 бериллиевых блоков (рисунок 11).

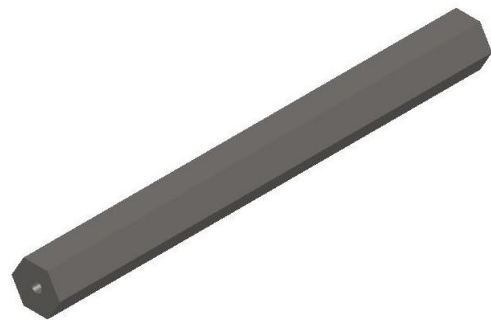


Рисунок 10. Бериллиевый блок

Таблица 6. «Веса» бериллиевых блоков в периферийных ячейках

№	Конфигурация активной зоны	ρ, %ΔК/к		Δρ <sub>BE</sub> , %ΔК/к	
		Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
1	(31+3) ТВС 1 <sup>го</sup> типа, 6 ТВС 2 <sup>го</sup> типа	0,06±0,03	0,08±0,04		
2	(30+3) ТВС 1 <sup>го</sup> типа, 6 ТВС 2 <sup>го</sup> типа, 1 Ве блок	0,35±0,03	0,49±0,07		
3	(30+3) ТВС 1 <sup>го</sup> типа, 6 ТВС 2 <sup>го</sup> типа, 2 Ве блока	0,71±0,03	0,85±0,12	0,36	0,36
4	(30+3) ТВС 1 <sup>го</sup> типа, 6 ТВС 2 <sup>го</sup> типа, 3 Ве блока	1,11±0,03	1,25±0,18	0,40	0,40
5	(29+3) ТВС 1 <sup>го</sup> типа, 6 ТВС 2 <sup>го</sup> типа, 4 Ве блока	0,89±0,03	1,06±0,15		
6	(29+3) ТВС 1 <sup>го</sup> типа, 6 ТВС 2 <sup>го</sup> типа, 5 Ве блока	1,34±0,03	1,51±0,21	0,45	0,45
7	(25+3) ТВС 1 <sup>го</sup> типа, 6 ТВС 2 <sup>го</sup> типа, 10 Ве блоков	0,94±0,03	1,10±0,15		
8	(25+3) ТВС 1 <sup>го</sup> типа, 6 ТВС 2 <sup>го</sup> типа, 11 Ве блоков	1,39±0,03	1,52±0,23	0,46	0,42
9	(25+3) ТВС 1 <sup>го</sup> типа, 6 ТВС 2 <sup>го</sup> типа, 12 Ве блоков	1,69±0,03	1,84±0,26	0,30	0,32
10	(22+3) ТВС 1 <sup>го</sup> типа, 6 ТВС 2 <sup>го</sup> типа, 16 Ве блоков	1,85±0,03	1,91±0,27		
11	(22+3) ТВС 1 <sup>го</sup> типа, 6 ТВС 2 <sup>го</sup> типа, 17 Ве блоков	2,17±0,03	2,26±0,32	0,32	0,35
12	(22+3) ТВС 1 <sup>го</sup> типа, 6 ТВС 2 <sup>го</sup> типа, 26 Ве блока	4,79±0,03	5,14±0,50		

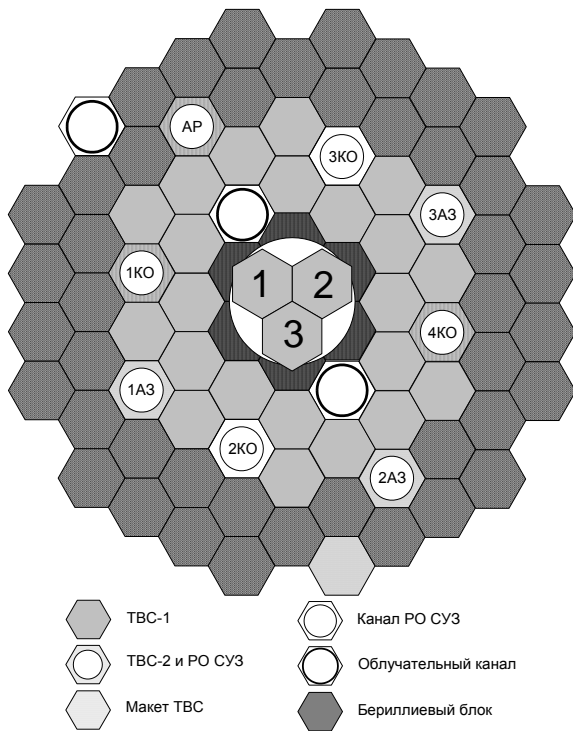


Рисунок 11. Картограмма загрузки активной зоны критического стенда

Оценены величины «стат.весов» центральных ТВС и макетов ТВС. Результаты «стат.весов» центральных ТВС и макетов ТВС приведены в таблице 7.

По результатам выполненной градуировки рабочих органов СУЗ оценены значения их эффективности, которые представлены в таблице 8.

Измерено распределение плотности потока тепловых нейтронов по шести граням центрального ТВС в положении 1. Расчетное азимутальное рас-

Таблица 8. Эффективность РО СУЗ

РО СУЗ		AP	1КО	2КО	3КО	4КО	1АЗ	2АЗ	3АЗ
Эфф., %Δk/k	Эксп.	0,29	1,92	2,51	2,38	1,95	1,12	0,81	0,95
	Расчет	0,26	1,56	1,92	1,94	1,50	1,05	0,78	1,08

Таблица 9. Азимутальное распределение плотности потока тепловых нейтронов

Направление	ТВС 2	Яч. 11-10	Яч. 9-10	Яч. 8-8	Яч. 8-7	ТВС-3
Эксперимент	1,0	1,28	1,15	1,04	1,25	0,98
Расчет	1,0	1,22	1,10	0,94	1,17	0,97

## Вывод

- Созданы различные расчетные модели твэла и ТВС с использованием компьютерного кода MCNP. По результатам тестирования выбрана модель гетерогенной ТВС с гомогенным твэлом, так как она показала наилучшее согласие с результатами эксперимента. В расчетах для каждой конфигурации активной зоны учитывается реальная загрузка урана.

- На критическом стенде сформирована активная зона с водяным отражателем и макетом облучательного устройства, содержащим три штатных ТВС реактора ВВР-К, установленным в центре ак-

тивной зоны. Загрузка активной зоны составила 37 ТВС 1<sup>го</sup> типа и 6 ТВС 2<sup>го</sup> типа; достигнут запас реактивности 2,3 % ΔK/K. Соответствующее расчетное значение 2,03 % ΔK/K.

Таблица 7. «Стат. веса» ТВС и макетов ТВС в облучательном устройстве, %<sup>Δk</sup>/k

№ положения	Расчет	Эксперимент	
1	ТВС	2,91±0,03	3,4±0,5
	Макет	0,55±0,03	0,5±0,1
2	ТВС	2,79±0,03	3,0±0,3
	Макет	0,52±0,03	0,5±0,1
3	ТВС	2,81±0,03	3,4±0,5
	Макет	0,45±0,03	0,5±0,1

Сравнительный анализ результатов эксперимента и расчета показал некоторые расхождения. Основными причинами расхождения расчета с экспериментом являются:

- Неопределенности в исходных данных для расчета за счет конструктивных и технологических допусков (большой разброс значений масс и геометрических параметров характеризующих ТВС);
- Большая погрешность экспериментального определения характеристик;
- Реальная высота подвески РО СУЗ несколько отличается от указанной в проектной документации. Следовательно, задаваемое в расчете положение поглотителя относительно активной части ТВС не соответствует реальности.

В целом, созданная расчетная модель адекватна реальной геометрии и материальному составу активной зоны критического стенда. Эта модель будет применена для расчетного обоснования перевода реактора ВВР-К на топливо с УНО.

- Для обоих вариантов загрузки экспериментально измерена плотность потока тепловых нейтронов в одной из центральных ТВС и распределение плотности потока тепловых нейтронов по высоте и азимуту центральной ТВС.

- Сравнение с экспериментом показало, что сформированная расчетная модель с использованием компьютерного кода MCNP адекватна реальной геометрии и материальному составу активной зоны критического стенда.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Возобновление эксплуатации реактора ВВР-К / под ред. Жотабаева Ж.Р. – Алматы.: А.о.ИАЭ НЯЦ РК, 1998. - 248 с.
2. Briesmeister, J.F. MCNP/4B General Monte Carlo N-Particle Transport Code / J.F.Briesmeister. - LA-12625-M.: 1994. – 741 p.
3. Соболев, И.М. Метод Монте-Карло / И.М. Соболев. - М.: Наука, 1968г. - 63 с.

### ССР-Қ РЕАКТОРЫ ҮШІН ЕСЕПТЕМЕ МОДЕЛДЕРІН ЖАСАУ

Шәймерденов Ә.А.

*ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан*

ССР-Қ реакторында төмен байыталған отыны бар тәжірибелік ЖШЖ-ның алда тұрған сынақтарын есептемелік костау үшін нейтрондардың сулы да, бериллийлі де шағылдырғышы бар активті аймақтық кескін үйлесімін дәл суреттеп беретін, MCNP компьютерлік кодты пайдалана отырып, есептеме моделдері жасалған.

Есептеме моделдеріне тест өткізу мақсатында активті аймақтың орталығына үш тәжірибелік ЖШЖ орналастыруға арналған сәулелелеуші құрылғының макетімен сындық стендінде моделдік эксперименттер жүргізілген. ЖШЖ-ның биіктігі мен азимуты бойынша жылулық нейтрондар ағыны тығыздығының үлестірілуі өлшенді.

ЖШЖ биіктігі мен азимуты бойынша нейтрондар ағыны тығыздығының есептеп шығарылған және эксперимент арқылы алынған үлестірімдері, сондай-ақ реттеу органдарының тиімділігі арасындағы жақсы үйлесім, жасалған есептеме моделінің пайдасын білдіреді.

### CREATION OF CALCULATION MODELS FOR WWR-K REACTOR

A.A. Shaimerdenov

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

In view of calculation support of forthcoming in-pile test of lead test assemblies with low-enrichment uranium fuel in the WWR-K reactor core, calculation models are created for the MCNP computer code – to reproduce core configurations with both water and beryllium neutron reflectors.

In order to test calculation models, modeling experiments with the irradiation carrier mockup which will be used to house three lead test assemblies in the core center, are carried out at critical assembly. Distributions of the thermal neutron flux density over the fuel assembly height and azimuth are measured.

Good agreement between calculated and experimental values of the thermal neutron flux density over the fuel assembly height and azimuth as well as the control rod worthies for both configurations of the core speaks in favor of the created calculation model.

УДК 550.34.064

## СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ДАННЫХ В ЦЕНТРЕ СБОРА И ОБРАБОТКИ СПЕЦИАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Сейнасинов Н.А., Гордиенко Д.Д.

*Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

Описана созданная в Центре данных Института геофизических исследований НЯЦ РК и успешно функционирующая система автоматизированного контроля за работой каналов регистрации, каналов связи со стационарными геофизическими станциями, а также за своевременностью поступления и обменом данными. Новым элементом работы системы контроля является реализованный мониторинг по параметрам сейсмических шумов. Приведены примеры применения такого метода контроля.

Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) был подписан в 1996 г., однако проблема контроля исполнения Договора пока полностью не решена: основной элемент ДВЗЯИ - Международная система мониторинга (МСМ), - находится в стадии доработки; не введены в строй все запланированные станции МСМ, проводятся исследования по методическому и программному обеспечению Международного центра данных (МЦД) и т.д. Одной из главных технических задач, подлежащих решению как на международном, так и на национальном уровнях, является обеспечение бесперебойного поступления данных от всех наблюдательных станций МСМ в Международный центр данных и контроль качества этих данных.

Строгие требования к качеству данных предъявляют все международные Центры данных, осуществляющие обработку, хранение и обмен сейсмических данных. В конце 80-х годов прошлого столетия для стандартизации и успешного обмена данными была создана международная Федерация цифровых сейсмических сетей (FDSN). В FDSN разработан стандарт для хранения и обмена данными – SEED (Standart for the Exchange of Earthquake Data), а также требования к качеству данных, таких, как дина-

мические параметры сейсмограмм, точность привязки по времени и др.

В Казахстане с середины 1990-х годов создана современная цифровая сеть станций НЯЦ РК, данные которой используются различными мировыми агентствами и исследователями (рисунок 1). Для сети очень актуальна задача непрерывного контроля качества данных, осуществление сейсмических калибровок с использованием новейших методик и международных требований.

В Центр сбора и обработки специальной сейсмической информации (ЦСОССИ) Института геофизических исследований (ИГИ) НЯЦ РК в г. Алматы данные поступают с 14 наблюдательных станций сети, из которых 8 являются сейсмическими группами. Данные поступают по 136 каналам от инфразвуковой и сейсмических станций, при этом объем поступающих данных в режиме реального времени составляет около 1300 Мбайт в сутки (рисунок 2). Контролю подлежат как объемы данных по каждому каналу, так их качество и своевременность прихода. Схема коммуникаций Центра данных со станциями и международными центрами показана на рисунке 3.

Данные поступают по спутниковым каналам, уходят из Центра по каналам Интернет и спутниковым каналам.

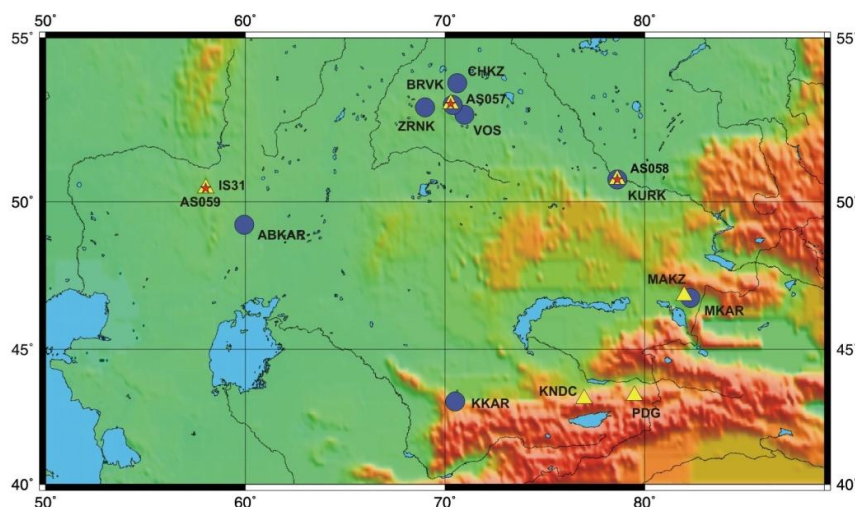


Рисунок 1. Сеть сейсмических станций Национального ядерного центра РК



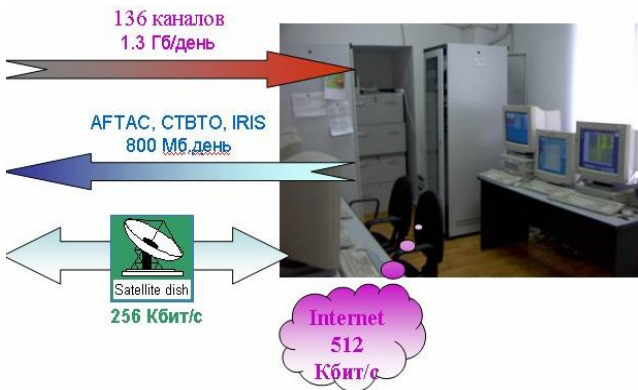


Рисунок 2. Объем поступающей информации в режиме реального времени

**ЗВУКОВОЕ И ВИЗУАЛЬНОЕ ОПОВЕЩЕНИЕ О ПРОБЛЕМАХ В СИСТЕМЕ**

В помощь дежурным аналитикам создано программное обеспечение визуального отображения состояния работы системы. Обеспечено постоянное цветное отображение состояния поступления и отправки данных в режиме реального времени в сети станций НЯЦ РК (рисунок 4).

При отображении статуса полученных данных зеленый цвет обозначает, что последний пакет данных получен/отослан в течение последних 20 мин; желтый - последний пакет получен/отослан (20 мин – 4 ч) назад; красный - последний пакет получен/отослан (4 – 24) ч назад; серый - последний пакет получен/отослан более 24 ч назад; оранжевый – база данных не обновлялась по каким-либо причинам в течение более чем 20 мин. Дежурный аналитик ЦСОССИ имеет возможность следить за ситуацией по приему и передаче данных. Кроме того, создано программное обеспечение, работающее с



Data collection status: (updated:08/05/09 06:21:13)

ABKAR	AS-057	AS-058	AS-059
BRVK	CHK	IZIKZ	KKAR
KNDC	KURK	PS-23	VOS
ZRN			

Рисунок 4. Отображение статуса прихода данных по станциям

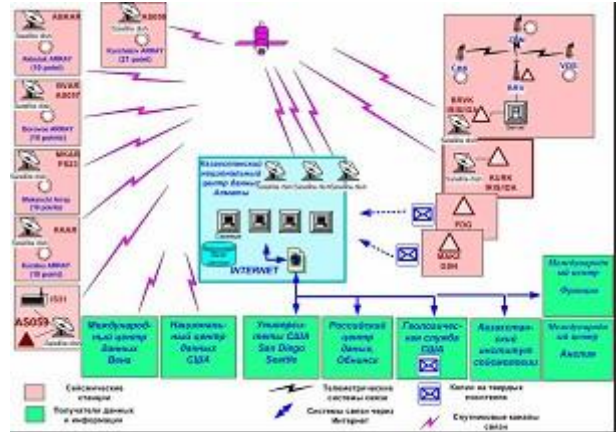


Рисунок 3. Общая схема системы связи в ЦСОССИ

данными в режиме реального времени, с помощью которого автоматически подаются голосовые сообщения об отсутствии данных или отсутствии обработки данных по конкретной станции. Обеспечена возможность слежения за работой спутниковых каналов связи: при наличии связи кнопка с названием станции - зеленая, при отсутствии связи – красная. Одновременно на систему мониторов выведены сейсмические записи по каждой станции (рисунок 5), что позволяет увидеть возможные проблемы по реальным записям. Слежение за объемом поступающих данных осуществляется путем систематического расчета статистики (таблица 1).

Определяется относительное количество данных, пришедших в ЦСОССИ, к объему, который должен быть получен. Подготовлены и функционируют два комплекса программ - по оперативному и окончательному расчету статистики поступивших данных. Оперативный расчет производится по данным, поступившим за текущие сутки.

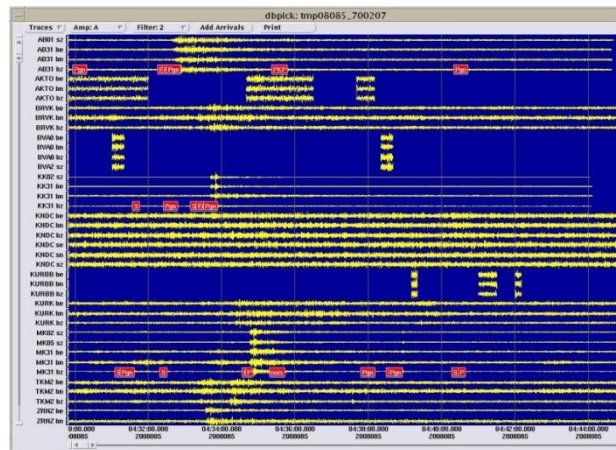


Рисунок 5. Отображение поступающих данных



Таблица 1. Фрагмент таблицы с информацией, поступившей в ЦСОССИ за сутки

Код станции	Канал	Кол-во сегментов	Дата начала сегмента	Время Начала сегмента	Дата конца сегмента	Время Конца сегмента	Кол-во данных
AB08	sz	18	02/17	00:00:00.000	02/17/08	23:59:59.975	100.00%
AB09	sz	18	02/17	00:00:00.000	02/17/08	23:59:59.975	100.00%
AB31	be	18	02/17	00:00:00.000	02/17/08	23:59:59.975	100.00%
	bn	18	02/17	00:00:00.000	02/17/08	23:59:59.975	100.00%
	bz	18	02/17	00:00:00.000	02/17/08	23:59:59.975	100.00%
BRVK	be	6	02/17	00:00:00.005	02/17/08	23:59:59.990	100.00%
	bn	6	02/17	00:00:00.005	02/17/08	23:59:59.990	100.00%
	bz	6	02/17	00:00:00.005	02/17/08	23:59:59.990	100.00%
BVA0	be	1	02/17	00:00:00.013	02/17/08	23:59:49.988	98.10%
	bn	1	02/17	00:00:00.013	02/17/08	23:59:49.988	98.10%
	bz	1	02/17	00:00:00.013	02/17/08	23:59:49.988	98.10%
BVA1	sz	1	02/17	00:00:00.013	02/17/08	23:59:49.988	98.10%
BVA2	sz	1	02/17	00:00:00.013	02/17/08	23:59:49.988	98.10%
BVA3	sz	1	02/17	00:00:00.013	02/17/08	23:59:49.988	98.10%
BVA4	sz	1	02/17	00:00:00.013	02/17/08	23:59:49.988	98.10%
BVA5	sz	1	02/17	00:00:00.013	02/17/08	23:59:49.988	98.10%
BVA6	sz	1	02/17	00:00:00.013	02/17/08	23:59:49.988	98.10%
BVA7	sz	1	02/17	00:00:00.013	02/17/08	23:59:49.988	98.10%
BVA8	sz	1	02/17	00:00:00.013	02/17/08	23:59:49.988	98.10%

### Принципы калибровки станций с помощью сейсмических шумов

Для технического мониторинга работы станций с использованием методики оценки сейсмических шумов предварительно тщательно изучены параметры сейсмического шума по каждой станции. На основе таких данных получены реальные модели шума и его естественных вариаций для широкого диапазона частот [2].

На рисунке 6 приведен пример спектральных кривых по станции Каратау, полученных за 3 месяца, когда станция работала нормально (октябрь - декабрь 2006 год).

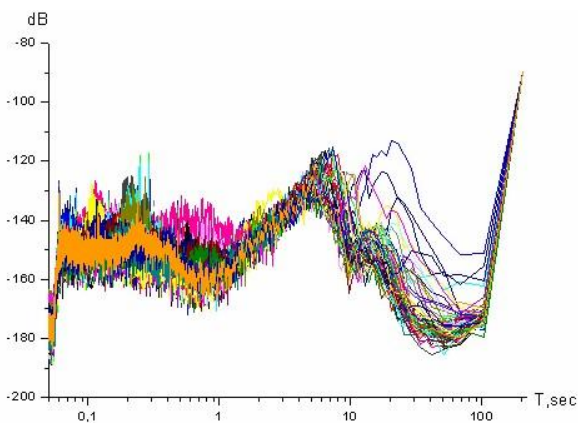


Рисунок 6. Спектральные кривые сейсмического шума. Станция Каратау. Период наблюдений - три месяца

Максимальный и минимальный уровни, описывающие вариации сейсмического шума, принимались в качестве нормальной модели шума для станции. В процессе мониторинга постоянно рассчитываются кривые шума за текущий день и сравниваются с полученными моделями. По расхождениям, выявляемым между ними, устанавливаются возникающие проблемы, связанные с работой аппаратуры, что способствует оперативному устранению неполадок.

На рисунке 7 приведены графики изменения уровня шума за период январь-март 2007 г. для трех значений периодов: 0,1 с, 1 с, 10 с.

Видно, что имеются дни, когда уровень шума превосходил нормальный уровень. Такие ситуации рассматривались специально. Первоначально анализировались те отрезки записей, которые были использованы для расчета шумов. Установлено, что в некоторых из них содержались записи слабых сейсмических событий (рисунок 8).

После выявления причин аномально высоких значений сейсмического шума, был произведен перерасчет уровня шумов по другим участкам сейсмической записи, что нормализовало их значение.

Кроме задачи контроля качества данных, рассчитанные спектральные плотности сейсмического шума используются для различных научных задач, например, для изучения временных вариаций сейсмического шума в связи с подготовкой сильных землетрясений, изучения сезонных вариаций сейсмических шумов, оценки влияния техногенных помех на качество данных и др.

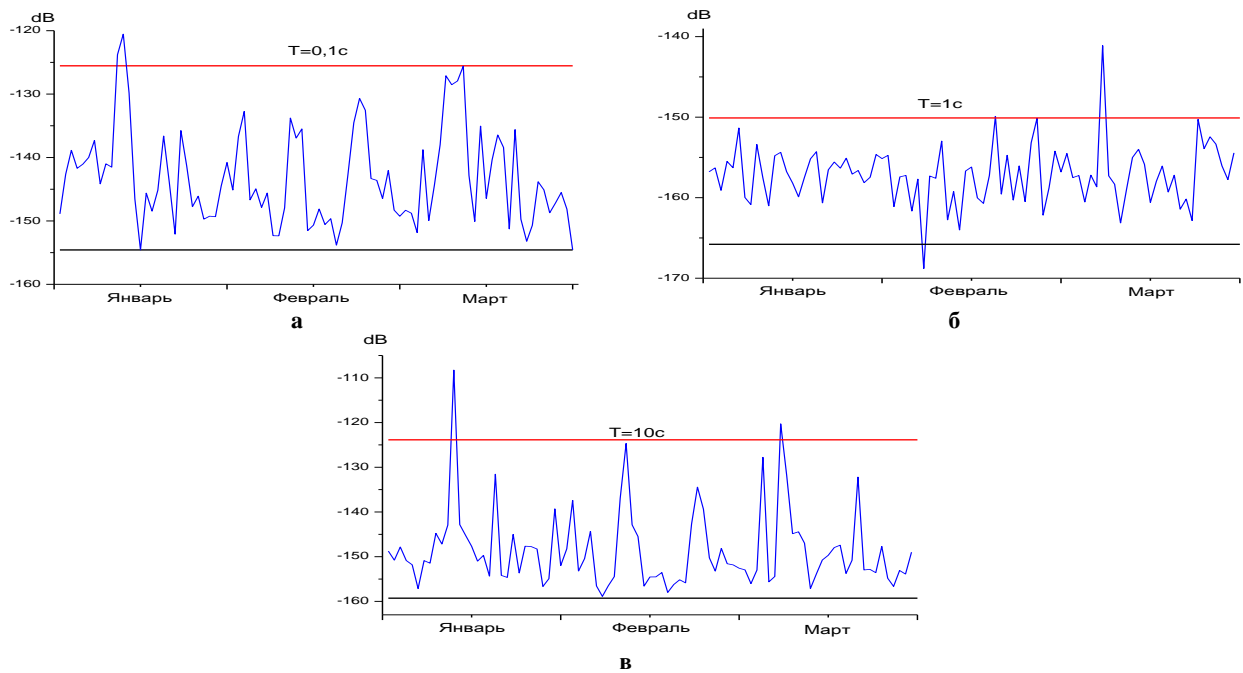
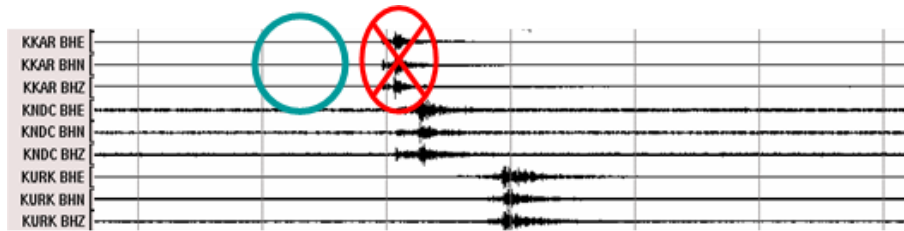


Рисунок 7. Графики изменения значений уровня сейсмического шума по станции Каратау для трех периодов



В красном кружке – запись слабого сейсмического – причины повышенного уровня шума;  
в голубом кружке – участок записи, по которому был произведен пересчет характеристик шума

Рисунок 8. Событие на сейсмограмме, обусловившее «высок» значения сейсмического шума (рисунок 7)

### ДИСТАНЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ РАБОТЫ ВСЕХ СИСТЕМ

В ЦСОСЦИ создан постоянно действующий Web-сайт ([www.kndc.kz](http://www.kndc.kz)), на котором отражаются результаты расчета объема информации, получаемой от наблюдательных станций в режиме реального времени. Это позволяет дистанционно следить за работой систем. Расчет осуществляется сначала в реальном времени, а позже, через 6 дней, производится окончательный расчет статистики. Если по каким-либо причинам имел место перерыв в приеме

данных и данные поступили с опозданием, это учитывается в окончательных расчетах. Формируется результирующий файл, содержащий сведения (в процентах) о работе за сутки станции и каждого ее канала. Для определения времени начала и конца перерывов в поступлении данных (если такие произошли), создана специальная программа, формирующая по регистрирующим каналам таблицу интервалов времени, в течение которых данные отсутствовали (таблица 2).

Таблица 2. Фрагмент таблицы с интервалами отсутствия данных

Код станции	Канал	Дата начала сегмента	Время начала сегмента	Время конца сегмента	Длительность сегмента
МК31	be	02/14/2008 00:00:00	07:59:40.000	08:00:00.000	20
МК32	se	02/14/2008 00:00:00	07:59:40.000	08:00:00.000	20
МК31	bn	02/14/2008 00:00:00	07:59:40.000	08:00:00.000	20
МК32	sn	02/14/2008 00:00:00	07:59:40.000	08:00:00.000	20
МК31	bz	02/14/2008 00:00:00	07:59:40.000	08:00:00.000	20
МК01	sz	02/14/2008 00:00:00	07:59:40.000	08:00:00.000	20
МК02	sz	02/14/2008 00:00:00	07:59:40.000	08:00:00.000	20
МК32	sz	02/14/2008 00:00:00	07:59:40.000	08:00:00.000	20

Аналогичным образом формируются файлы с объемом поступивших данных от каждой станции НЯЦ РК. По истечении месяца на основании файлов с данными за сутки формируется итоговый отчет о работе станций и каналов за месяц. В качестве примера в таблице 3 приведен фрагмент сводных статистических данных о работе станции PS23-Маканчи за февраль месяц 2008 г.

Для слежения за работой каналов связи каждые 10 мин из ЦСОССИ проводится опрос основных компьютеров, установленных на каждой сейсмической станции для сбора данных от элементов и для передачи этих данных в ЦСОССИ. О случаях пере-

боя в работе канала связи оператор информируется по электронной почте или звуковым сигналом. Пример сообщения о перебоях в работе канала связи приведен в таблице 4.

Таблица 3. Объем данных, поступивших в ЦСОССИ за февраль месяц 2008 г. от станции PS23-Маканчи

Канал	%	Канал	%	Канал	%
МК01	98,46	МК02	97,92	МК03	97,91
МК04	90,76	МК05	98,45	МК06	97,94
МК07	97,33	МК08	97,73	МК09	97,96
М31e	96,99	М31n	96,99	М31z	96,99
М32e	99,69	М32n	99,69	М32z	99,69

Таблица 4. Сообщение об отсутствии связи по каналу

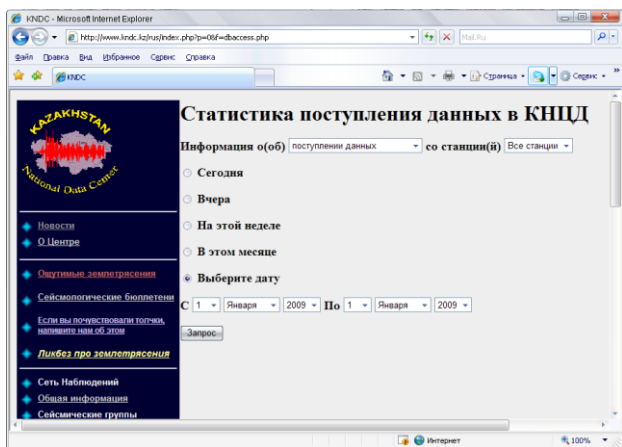
Имя станции	Дата	Имя станции	Дата
NO_KURK	02/15/08 03:43:58	NO_MkarRT	04/15/03 18:47:52
NO_MkarRT	02/15/08 18:25:52	NO_CHK	04/15/03 19:11:52
NO_MkarOW	02/15/08 18:25:52	NO_CHK	04/15/03 20:47:52

Кроме оперативного и окончательного расчетов статистики данных, поступивших в ЦСОССИ, имеется возможность сравнить их со сведениями, переданными в Национальный центр данных США и Международный центр данных ОДВЗЯИ (Вена).

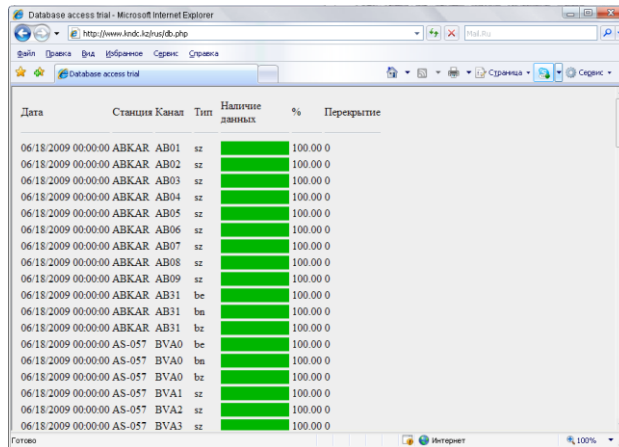
Для удобства пользователей, особенно удаленных от ЦСОССИ на Web-сайте (www.kndc.kz) доступ к данным мониторинга состояния станций и поступления данных реализован следующим образом. На первой странице навигационной панели (в русской и английской версиях) имеются две ссылки. Первая из них - «Статистика поступления данных» - направляет пользователя к странице, на которой можно сформировать запрос к базе данных и получить необходимый ответ (рисунок 10). Вторая ссылка - «Задержка поступления данных» открывает окно, в котором отображается время поступления последнего пакета данных и время отсылки последнего пакета данных в другие Центры. Цветовая кодировка, как показано на рисунке 4, информирует о

временном режиме отправки/получения последнего пакета данных. Частота обновления информации на Web-сайте составляет 12 ч.

Созданный инструмент позволяет оперативно и удаленно от станций получать информацию о поступлении и пересылке пакетов данных. Сейсмическое событие также обрабатывается оперативно и данные о нем в течение 15 минут выставляются на Web-сайте в разделе «Ощутимые землетрясения». Указываются точные координаты информация об интенсивности землетрясения и его последствиях. Так как доступ к данным происходит через Web-сервер, то информацию можно получать при помощи любого браузера с любого компьютера, независимо от того, под управлением какой операционной системы он работает. Обработанные данные включаются в сейсмический бюллетень ЦСОССИ, сопровождаемый картой эпицентров землетрясений (рисунок 11). Сейсмологический бюллетень за 2008 год включил 17 078 событий.



а



б

Рисунок 10. Страница запроса (а) и пример ответа на запрос (б) о поступлении данных в ЦСОССИ

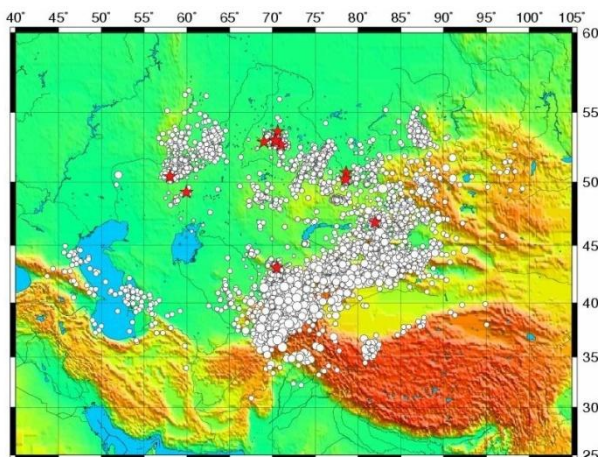


Рисунок 11. Сейсмический бюллетень ЦСОССИ ИГИ НЯЦ РК за 2008 год

Созданные в ЦСОССИ автоматизированные системы и технологии контроля объемов и качества данных позволили казахстанскому центру стать одним из лучших национальных центров в Международной системе мониторинга. Международные центры стабильно получают более 95 процентов данных, зарегистрированных станциями НЯЦ РК. Данные станций НЯЦ РК доступны и широко используются исследователями всех стран мира в интересах глобальной сейсмологии, а также в Казахстане для решения задач оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Беляшова, Н.Н. Система мониторинга ядерных испытаний НЯЦ РК: развитие и возможности / Н.Н. Беляшова, Н.Н. Михайлова // Вестник НЯЦ РК, 2007. – Вып. 2. – С. 5 – 8.
2. Михайлова, Н.Н. Спектральные характеристики сейсмического шума по данным Казахстанских станций мониторинга / Н.Н. Михайлова, И.И. Комаров // Вестник НЯЦ РК, 2006. – Вып. 2. – С.19 – 26.

### АРНАУЛЫ СЕЙСМИКАЛЫҚ АҚПАРАТЫН ЖИНАУ ЖӘНЕ ӨНДЕУ ОРТАЛЫҒЫНДА ДЕРЕКТЕР САПАСЫН БАҚЫЛАУ ЖҮЙЕСІ

Сейнасинов Н.А. , Гордиенко Д.Д.

*ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

ҚР ҰЯО Геофизикалық институтының Деректер орталығында жасалған және табысты іс-қимылдағы тіркеу арналардың, стационарлық сейсмикалық станциялармен байланыс арналардың жұмысын, деректер дер кезінде түсу және жіберілуіне автоматталған бақылау жүйесі сипатталған. Тіркеу жүйелер жұмысын бақылауының жаңа элементі болып табылатыны – сейсмикалық шулар параметрлерінің мониторингі. Бақылаудың сол әдісінің үлгілері келтірілген.

### QUALITY CONTROL SYSTEM AT THE CENTER OF ACQUISITION AND PROCESSING OF SPECIAL SEISMIC INFORMATION

N.A. Seinasinov, D.D. Gordienko

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

A created automated control system was described that was successfully functioning in the Data Center of the Institute of Geophysical Research NNC RK to control recording and communication channels, timely data arrival and departure. One of the new elements of operation control is seismic noise monitoring parameters. Examples of the application of such approach were given.

УДК 621.039:338; 621.039.001.18; 621.039:658

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЯТЦ ДЛЯ РАЗВИТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

Кукушкин С.М., Мукенева С.А., Тур Е.С., Цынгаев В.М.

*Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов*

В процессе выполнения настоящей исследовательской работы был осуществлён сбор исходных данных по современным разновидностям замкнутого ядерного топливного цикла – видах и технико-экономических характеристиках элементов в него входящих (реакторов, заводов по обогащению топлива, заводов по регенерации топлива, хранилищах и пр.), а также по долгосрочным тенденциям его усовершенствования.

Сформулированы критерии и технико-экономические показатели, а также осуществлён выбор моделей для проведения технико-экономических оценок долгосрочного развития энергетического сектора страны на основе внедрения элементов замкнутого ядерного топливного цикла. Определен массив исходных параметров необходимых для работы этих моделей.

Изучены три наиболее возможные долгосрочные стратегии развития ядерного энергетического сектора республики с учетом сооружения и эксплуатации элементов замкнутого ядерного топливного цикла, исходя из которых определены расчётные схемы, описывающие состав и принципы взаимодействия элементов ЯТЦ.

Произведён расчёт технико-экономических показателей для каждой схемы и анализ чувствительности этих показателей к изменениям в исходных параметрах.

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие любой отрасли энергетики требует проведения предварительных работ по планированию, включающих, в том числе, работы по разработке различных стратегий, их критическому анализу и выбору наилучших из них. Казахстан, как страна желающая осуществить диверсификацию собственной энергетической системы, также не может избежать деятельности по планированию, в особенности потому, что одной из будущих отраслей энергетики предполагается ядерно-энергетическая. А ядерно-энергетическая энергетика требует проведения подобных работ с особой тщательностью – небрежность в выборе путей развития может привести к значительным финансовым издержкам, которые, в конечном счёте, лягут на плечи налогоплательщика и к высокому риску радиационного облучения населения.

В настоящем исследовании представлены стратегии развития ядерных топливных циклов (ЯТЦ) в Республике, основанные на предположениях о развитии научных, проектных и производственных мощностей, а так же проводится их экономическая оценка и сравнение. Основным экономическим параметром, используемым в данной работе для сравнения предложенных стратегий ЯТЦ, является полная себестоимость электроэнергии, отпускаемой с шин реактора. Данные, скомпилированные в этой работе, могут быть полезны для выполнения дальнейших исследований схем этих топливных циклов и проверки новых предположений по стоимости и техническим данным.

Изучение результатов многочисленных зарубежных исследований по вопросам себестоимости различных стратегий ЯТЦ показывает как широкий разброс значений для каждой, так и существование значительных пересечений между ними. В общем,

из результатов исследований следует, что значение себестоимости топливной составляющей открытого топливного цикла зависит от неопределённостей в рыночных ценах на уран и на услуги производств начальной стадии ЯТЦ, и политики формирования себестоимости размещения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). А для себестоимости топливных компонент замкнутых топливных циклов наиболее важными являются неопределённости в технологиях изготовления "горячего" топлива (управляемых дистанционно), разделения актинидов, и процессов размещения радиоактивного топлива (РАО). В вариантах с замкнутыми топливными циклами, способы и средства, необходимые для производства реакторного топлива, будут менее чувствительны к динамике рынка и произведут меньшее количество отходов, которые пришлось бы размещать в геологических могильниках.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

#### Стратегии развития ЯТЦ в Казахстане

Основой рассматриваемых в настоящем отчёте схем ЯТЦ служат три наиболее популярные и исследованные базовые стратегии развития современных ЯТЦ. Под стратегией здесь понимается - общий подход к управлению топливом, который охватывает диапазон вариантов ЯТЦ с аналогичными основными характеристиками. Стратегия определяет: какие топливные материалы будут подвергаться переработке (если это имеет место), тип атомной электростанции и тип топлива, тип технологии переработки ОЯТ, а также какие материалы, ОЯТ и/или выделенные из ОЯТ изотопы, пойдут в геологическое захоронение.

### Описание стратегий

#### Схема 1: ЛВР поколения III+ и открытый топливный цикл

Стратегия открытого топливного цикла на основе топлива из диоксида урана и наиболее безопасных из эксплуатируемых в настоящий момент реакторов – легководяных реакторов (ЛВР) поколения III+. В данной схеме ЯТЦ отработанное ядерное топливо считается высокоактивными радиоактивными отходами и вместе с остаточными делящимися изотопами исключается из дальнейшего использования – поступает на хранение или захоронение. Поэтому разомкнутый ЯТЦ характеризуется низкой эффективностью использования природного урана (до 1%). При строительстве реакторов предполагается использование подхода сдачи “под ключ”, то есть с минимальным участием казахстанских организаций.

Эта стратегия является наиболее вероятной для развёртывания в Казахстане, как стране с зачаточным развитием энергогенерирующих мощностей на основе АЭС, по крайней мере, в ближайшие 2-3 десятилетия.

#### Схема 2: ЛВР поколения III+ с использованием МОКС-топлива

Эта стратегия основана на использовании существующих типов атомных электростанций на основе реакторов поколения III+ на тепловых нейтронах с легководным теплоносителем и включает повторное использование в тепловых реакторах различных видов топлива: на основе двуоксида урана, Pu-Np-МОКС и Am-Cm-МОКС. Настоящая схема включает исследование самых сложных вариантов из диапазона присущего данной стратегии, включая изготовление и использование Am-Cm-МОКС топлива в качестве выжигаемой мишени. В дополнении к схеме 1, в данной схеме (и последующей) рассматривается сооружение в республике ряда производств конечной стадии ЯТЦ.

Определённая выгода стратегий (эта схема и последующая) использующих переработку ОЯТ и его повторное использование в виде топлива или выжигаемой мишени состоит в том, что упрощается окончательное захоронение РАО из-за уменьшения количества, объема и стоимости хранилищ. Устранение ядер  $^{237}\text{Np}$  сделает более предсказуемым поведение хранилища в период между сотней тысяч лет и миллионом лет [1]. Кроме того, образцы  $^{129}\text{I}$ ,  $^{14}\text{C}$ , и  $^{99}\text{Tc}$  можно перевести в специальные формы для отходов, например, в сплавы, которые окажутся нерастворимыми в воде. Эти вещества, особенно  $^{99}\text{Tc}$ , оказываются важными с точки зрения прогнозируемых изъятий из хранилищ в промежутке от 1000 до 100000 лет. Вариантом могут также стать специальные трансмутационные установки для таких изотопов [2]. Другими долгоживущими радиоактивными изотопами, которые уйдут в хранилище, окажутся  $^{59}\text{Ni}$  и  $^{93}\text{Zr}$  и ряд других изотопов, не растворимых в воде.

В случае геологического могильника максимальная вместимость определяется зависящей от времени скоростью выделения тепла при распаде помещенных в хранилище отходов. Если все трансурановые элементы (главным образом, это нептуний, плутоний, америций, кюрий) удалены из отходов, уменьшение долгосрочной тепловой нагрузки, испытываемой хранилищем, позволит увеличить его вместимость в 2.7-4 раз [3].

#### Схема 3: ЛВР поколения III+, переработанное ОЯТ которых используется в быстром реакторе - дожигателе

Эта стратегия - симбиоз тепловых реакторов и быстрых реакторов, в которых повторно используются трансурановые элементы от ОЯТ до тех пор, пока почти все трансурановые элементы не будут разрушены. Внедрение реакторов на быстрых нейтронах делает эту стратегию экологически привлекательной с точки зрения длительного хранения. Накопление трансурановых элементов во время повторного использования ядерного топлива управляется и ограничивается реакторами на быстрых нейтронах, служащими дожигателями трансурановых элементов (ТУЭ).

Быстрые реакторы могут в конечном итоге преобразовать все ТУЭ и все продукты деления, хотя это потребует непрерывную и длительную переработку ядерного топлива. Когда ТУЭ убираются из отходов, тепловая нагрузка на хранилище снижается на 40-80 [4] раз по сравнению с не прошедшим переработку ОЯТ. Предельная цель стратегий с использованием переработки и повторного использования ОЯТ заключается в уменьшении выделяемого отходами тепла ограничивающего вместимость хранилища.

### Методология оценки ЯТЦ

Используемый в настоящей работе подход к экономическому расчёту схем ЯТЦ основан на предположении равновесного состояния топливного цикла и обеспечивает первоначальный инструмент для сравнения открытых и замкнутых топливных циклов. Анализ не включает динамические состояния, такие как запуск предприятия, снижение объёма производства, состояния присущие завершающей стадии эксплуатации, стратегии временного и долгосрочного хранения, а также транспортировку. В расчёт входит оценка потоков материалов ЯТЦ (топлива, актинидов, низко-, средне- и высокоактивных РАО и пр.). Выполняемый только по трём схемам ЯТЦ анализ должен, однако, обеспечить в целом понимание требований к моделированию потоков материалов и объёмов производств. Это исследование обеспечит базис для сравнения более разветвлённых и детальных схем ЯТЦ, рассмотрение которых может потребоваться в будущем.

Главная трудность в экономической оценке проектов с длительным временем жизненного цикла состоит в том, что будущие стоимости соответствующим



щих экономических параметров не известны. Они должны или быть оценены, или должен быть выбран такой метод, который не требует оценки. Ключевым параметром здесь будет являться цена на электричество в будущем, которая требуется, чтобы вычислить поток будущего дохода для каждого варианта ЯТЦ. Только два параметра основаны на приведённой стоимости – минимальная приведённая стоимость общих затрат на осуществление ЯТЦ и приведённая стоимость электроэнергии (LUEC), не требуют вычисления этого потока. Параметр, основанный на минимальной приведённой стоимости общих затрат на осуществление ЯТЦ, является самым простым. Однако он не принимает во внимание возможные изменения в производстве энергии для различных вариантов ЯТЦ. Поэтому метод, предлагаемый к использованию в этой работе, базируется на оценке LUEC – широко используемой методологии рекомендуемой МАГАТЭ, ОЭСР/АЯЭ и МЭА.

В реальных проектах АЭС эксплуатирующие организации обычно используют "бизнес модели", где прогнозы таких ежегодных потоков денежных средств и ежегодной выработки электроэнергии вводятся в комплексную сводную ведомость, для последующего вычисления требующегося дохода и потребности в финансировании. Однако если целью стоит только сравнение технологий, такие модели потока денежных средств оказываются слишком сложными, поскольку входные данные часто просто не существуют в столь детальном уровне,

необходимом для расчётов по "бизнес модели". По этой причине в данном исследовании используется экономическая оценка с использованием метода приведённых затрат, как показано на правой стороне рисунка 1. По существу все затраты передней части (проектирование, строительство, запуск, и финансирование) сведены в единичные полные капитальные затраты. Эти единичные затраты затем возвращаются в течение периода эксплуатации АЭС посредством коэффициента возврата капитала, который в свою очередь зависит от предполагаемых процентов или коэффициент дисконтирования. Обратный пересчёт по алгоритму возврата капитала используется для возврата в течение срока операционной жизни станции будущей стоимости операций по дезактивации и выводу из эксплуатации. Другие ежегодные затраты, такие как топливные, не связанные с топливом операции по эксплуатации и техническому обслуживанию, и по капитальному ремонту рассчитываются или вводятся в модель как средние (обычно в млн. \$/год) величины, которые остаются постоянными в течение всех лет эксплуатации. Средняя предполагаемая выработка электроэнергии также имеет постоянное значение. Это, более простое представление экономической оценки, минимизирует количество требуемых данных, которые понадобятся при более детальной проработке на последующей стадии проектных работ по строительству конкретных станций и производств для ядерной отрасли РК.

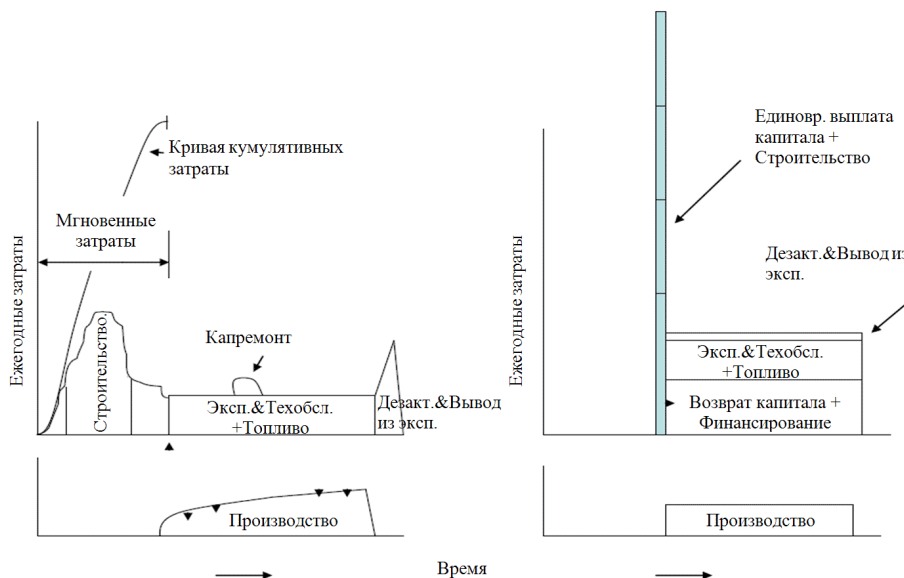


Рисунок 1. Концепция приведения затрат

**Исходные данные**

Каждая схема ЯТЦ разбивается на модули, где каждый модуль – это один из этапов ЯТЦ (например – добыча, конверсия, обогащение и т.д.). Данные по затратам производств каждого модуля отбираются путём анализа информации содержащейся в информационных бюллетенях промышленных и энергетических

предприятий, международных документах, и всевозможных экономических исследованиях, выполняемых различными научными организациями в области ядерной энергетик (например "Red Book" [5], "Ежегодник урановой промышленности" DOE-АЯЭ [6], "Анализ уранового предложения до 2050" [7]).

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЯТЦ  
ДЛЯ РАЗВИТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ**

Таблица 1 описывает модули затрат начальной и завершающей стадий ЯТЦ используемые в этих трёх схемах и связанные с ними распределения стоимости. Номинальные значения основаны на данных по стоимости, которые были отобраны из сформированного массива исходных данных по затратам для производств, установок и сооружений каждого модуля. Диапазон неопределённости стоимостей определен для 20 основных модулей затрат. Нижнее и высшее значения основаны на исторических данных или результатах исследований, определенных в соответствии с суждениями экспертов. Так как данные по стоимостям прогнозируются более чем на 15 лет в будущее, предполагается общий ядерный рост, как в Казахстане, так и во всём мире.

Поскольку в республике ещё не был осуществлён окончательный выбор производителя легковод-

ного реактора в данном исследовании для оценки баланса материалов топливного цикла и сбора данных по затратам используется доступная информация по ряду реакторов поколения III и III+: ВВЭР-1000 (на основе проекта В-392), AP-1000, ABWR-1356, System 80+. Также для оценки баланса материалов топливного цикла и сбора данных по затратам используется доступная информация по ряду быстрых реакторов БН-600 (Россия), Superphenix (Франция), и Monju (Япония). Характеристики этих реакторов служат отправной точкой для формирования требований по количеству производимой продукции для других модулей топливного цикла: добычи и переработки урановой руды, конверсии жёлтого кека в UF<sub>6</sub>, обогащения урана, изготовления топлива, и обращению с ОЯТ, переработке и захоронению отходов.

Таблица 1. Неопределённость стоимости модуля ЯТЦ

Модуль затрат	Описание модуля	Единица измерения	Распределение стоимости		
			Нижнее (мин.)	Номинал (среднее или мода)	Высшее (макс.)
<b>Начальная стадия ЯТЦ</b>					
A	Добыча и переработка урановой руды	\$/кг U	100	150	300
B	Конверсия в UF <sub>6</sub>	\$/кг U	5	10	15
C1	Обогащение (U)	\$/EPP	100	130	160
D1-1	UO <sub>2</sub> топливо ЛВР	\$/кг U	180	230	280
D1-2	МОКС (Pu, Np) топливо	\$/кгТМ	1600	3200	6000
D2-1	Металлич. топливо БР (без бланкета)	\$/кгТМ	2200	5000	6000
D2-2	Металлич. топливо БР (с бланкетом)	\$/кгТМ	2420	5500	6600
D2-3	МОКС (Am, Cm) выгорающее топливо	\$/кгТМ	3000	10000	20000
E3	Хранилище продуктов рециклинга	\$/кгВА	14600	17600	21000
K1	Конверсия/захоронение обедн. UF <sub>6</sub>	\$/кгU	6	12	30
<b>Завершающая стадия ЯТЦ</b>					
E2	Сухое хранилище ОЯТ	\$/кгТМ	100	200	300
F1	Водная переработка ОЯТ	\$/кгТМ	1800	2000	3000
F2	Пирометаллургическая переработка ОЯТ	\$/кгТМ	1765	2700	5000
G1	Кондиционирование ВАО	\$/кгПД	2000	5400	10800
G3	Кондиционирование НАО	\$/м <sup>3</sup>	400	500	1000
G4	Кондиционирование САО	\$/кгМеталл	200	540	1800
J	Приповерхностное захоронение	\$/м <sup>3</sup>	450	1200	2500
K2	Хранение/захоронение выделенного U	\$/кгU	60	75	90
L1	Захоронение ОЯТ	\$/кгТМ	381	528	900
L2	Захоронение ВАО	\$/кгТМ	152	211	360
R1	ЛВР	\$/кВт(э)	1200	1800	2700
R2	БР	\$/кВт(э)	1600	2200	6000

**Построение расчётных моделей**

Ниже представлены расчетные модели для трех стратегий развития ядерной энергетики в РК. Схемы технологических процессов, описывают качественную взаимосвязь между модулями топливного цикла и потоками материалов.

Так наиболее распространённая в мире схема ЯТЦ представлена на рисунке 2. В данной схеме ЯТЦ все изотопы ОЯТ сохраняются вместе, то есть их переработка не предполагается, и, в конечном счете, отправляются в геологический могильник.

Топливный цикл, представленный на рисунке 3, является более сложным. Необходимость его рассмотрения возникает из того факта, что отработанное ядерное топливо ЛВР имеет значительное количество минорных актинидов (Am, Cm), что представляет собой про-

блему существенной тепловой нагрузки при длительном сроке размещения ОЯТ в могильнике. Спектр тепловых нейтронов ЛВР способен преобразовывать некоторые из этих радионуклидов в короткоживущие радиоизотопы. В этой схеме предполагается, что процесс регенерации UREX+3 применяется главным образом (95 %) к топливу ЛВР на основе диоксида урана, и частично к МОКС топливу (5 %) собственного топливного цикла реактора. Выделенные потоки Pu-Np и Am-Cm смешиваются с диоксидом урана и помещаются в активную зону как “генерирующее” и “поглощающее” нейтроны МОКС топливо соответственно. Сборки с МОКС топливом занимают приблизительно одну четвертую часть активной зоны, а остающаяся часть заполнена обычным обогащенным топливом на основе диоксида урана.

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЯТЦ  
ДЛЯ РАЗВИТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ**

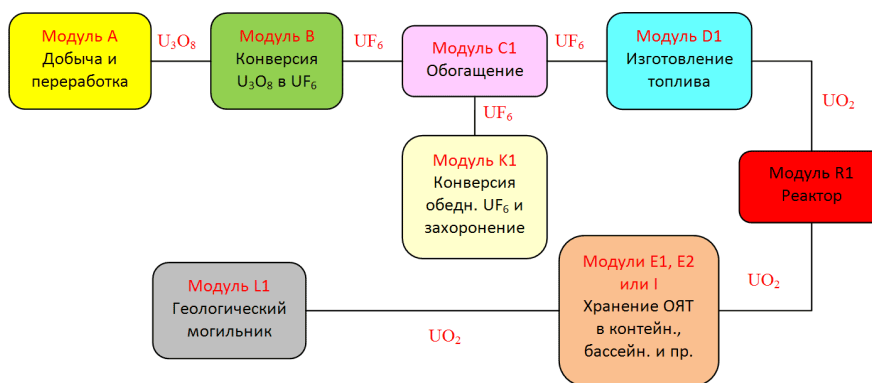


Рисунок 2. Технологический процесс по схеме 1

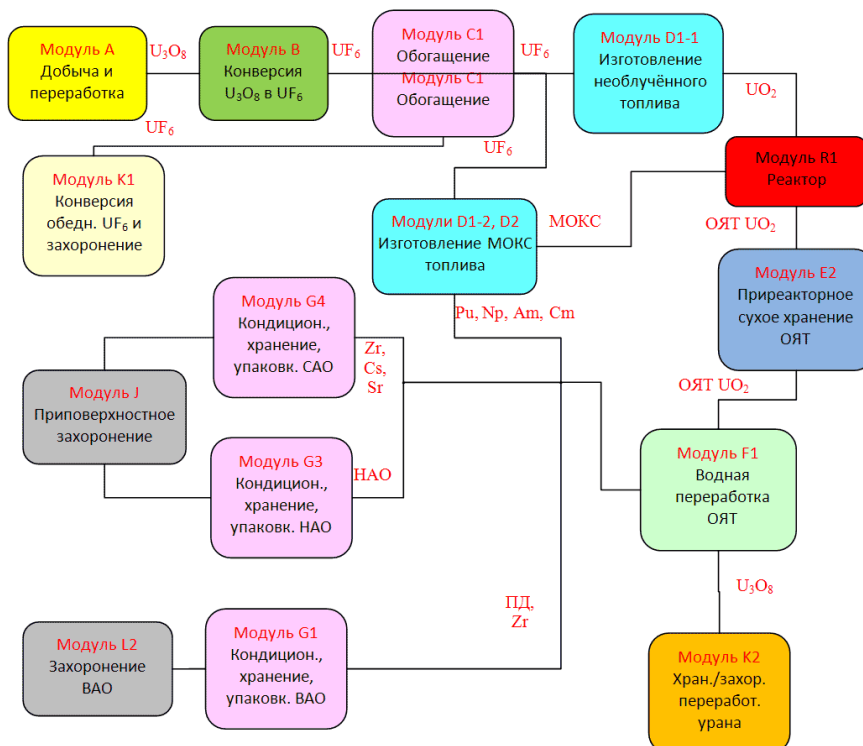


Рисунок 3. Технологический процесс схемы 2

Для того чтобы смоделировать равновесную систему по третьей схеме развития ЯТЦ (рисунок 4), электрическая мощность которой на ~27% обеспечивается быстрыми ядерными реакторами-конвертерами, была определена эквивалентная система с тепловыми быстрыми реакторами. Предполагается, что быстрые реакторы-конвертеры работают с очень высокими показателями выжигания актинидов, коэффициент конверсии для них составляет 0.25. Этот коэффициент определяется как число произведённых атомов делящегося вещества, делённое на количество выгоревших делящихся атомов. В этом случае получается, что приблизительно два ЛВР с мощностью 1300 МВт эксплуатируются в тех же самых условиях как и в Схеме 1 и используют регенерированное топливо, полученное с помощью водных UREX+ технологий переработки. Кроме того, выделенные актиниды обес-

печивают почти 24% потребности в делящихся материалах для равновесного топливного цикла с быстрым натриевым реактором дожигателем мощностью 1000 МВт. Стоимость ядерного топливного комплекса (ЯТК) в терминах \$/кВт·час рассчитывается и для ЛВР, эксплуатируемых по замкнутому циклу, и для быстрого реактора, работающего в режиме дожига. Подвергнутые переработке актиниды ЛВР составляют поток подпиточных ядерных материалов для быстрого реактора. Реактор-дожигатель располагают рядом с установкой пирохимической технологии переработки топлива, для того чтобы продолжить перерабатывать обеднённый уран и актиниды для будущего топлива быстрых реакторов. Продукты деления конвертируются в керамические отходы, а пиро-металлические отходы подготавливаются для захоронения в виде ВАО.

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЯТЦ  
ДЛЯ РАЗВИТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ**

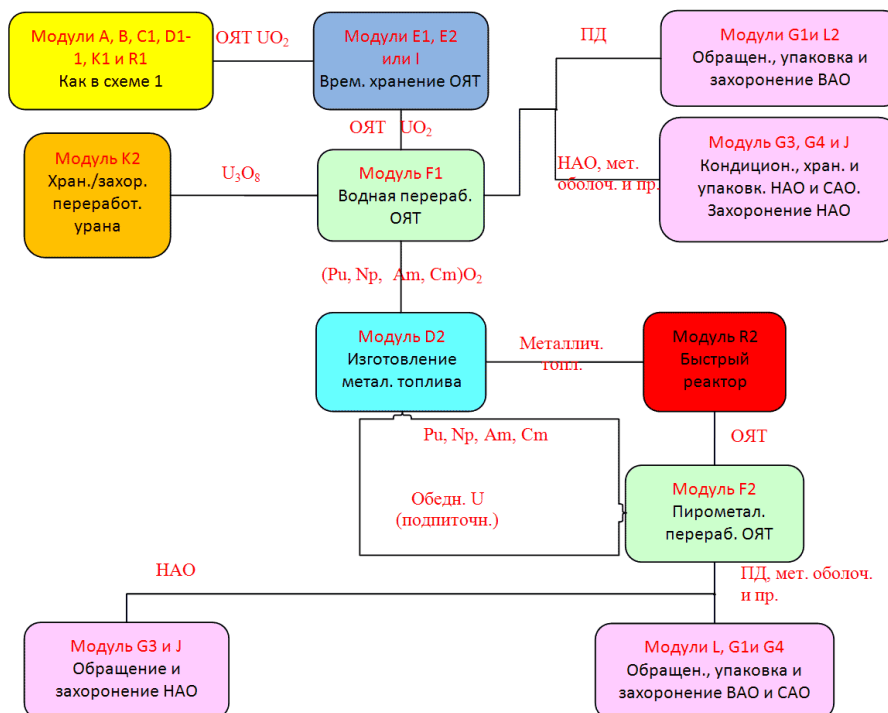


Рисунок 4. Технологический процесс схемы 3

**Анализ чувствительности**

Для оценки распределений себестоимости трёх схем ЯТЦ основанных на заданных вероятностных условиях был выполнен анализ чувствительности себестоимости электроэнергии. В этом анализе использовались два типа оценок: на основе дискретных значений стоимости каждого модуля (только минимальное, только максимальное или только номинальное) и на основе имитационной модели, работающей по методу Монте-Карло, в которой случайным образом разыгрывались составляющие себестоимости каждого модуля в диапазоне между их минимальными и максимальными значениями.

На рисунке 5 показан профиль частотного риска, полученный на имитационной основе. Из него видно, что схема 1 и схема 2 практически полностью перекрываются, они схожи по ширине диапазона, однако максимумы распределения смещены друг относительно друга. Схема 3 отличается от схем 1 и 2,

поскольку её распределение существенно шире (вызвано большим уровнем неопределённости ряда модулей), хотя максимум её распределения весьма близок к максимуму схемы 2.

В таблице 2 приведены некоторые статистические результаты для всех трёх схем.

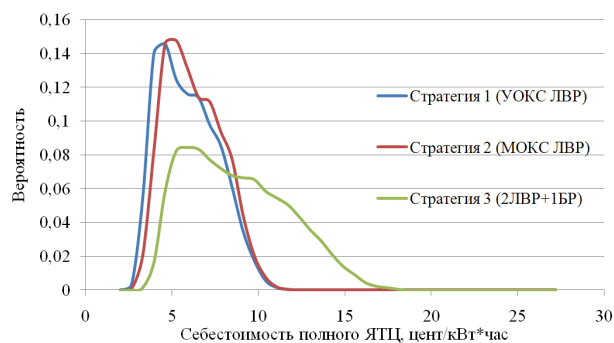


Рисунок 5. Профиль частотного риска

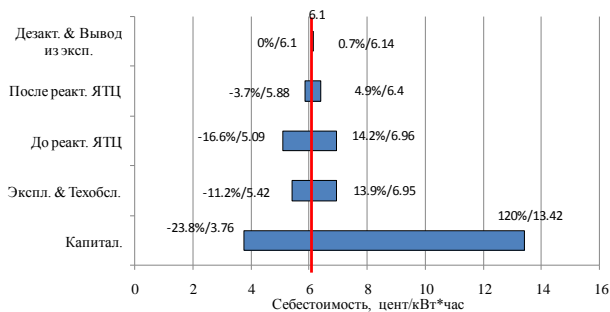
Таблица 2. Результаты дискретного и имитационного моделирования

Параметр		Схема 1 Открытый цикл, цент/кВт·час	Схема 2 ЛВР с МОКС топливом, цент/кВт·час	Схема 3 Закрытый цикл, цент/кВт·час
Диск	Минимум	1.83	1.87	1.75
	Номинал	4.72	5.02	4.6
	Максимум	15.4	17.1	27.4
Имитац.	Мода	4.37	5.11	5.28
	Медиана	5.9	6.25	8.49
	Мат. ожидание	6.1	6.4	8.71
	Минимум (80%)	3.86	4.2	4.86
	Максимум (80%)	8.66	8.9	13.3

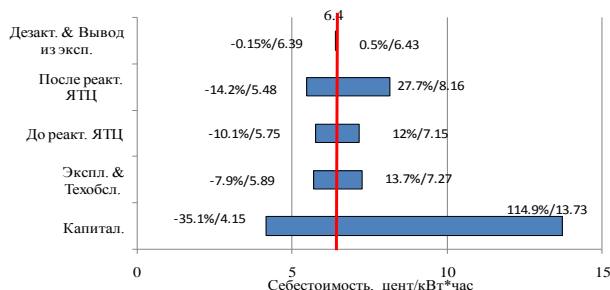
**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЯТЦ  
ДЛЯ РАЗВИТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ**

Из таблицы видно, что значение себестоимости для номинальных величин модулей каждой из трёх схем близки к вычисленной вероятностным методом моде, а также видно, что значения мат. ожиданий и медиан практически совпадают. Согласно рекомендациям [8] по проведению анализа чувствительности и оценки рисков реализации проектов "... оценка отвечает заданным качественным требованиям, если ожидаемые диапазоны точности достигнуты. Диапазоны могут быть определены, посредством выбора значений распределения находящихся в промежутке от 10% до 90%". Были определены наиболее вероятные диапазоны распределения себестоимости. Видно, что минимальные и максимальные значения этих диапазонов колеблются относительно величин мат. ожидания в пределах 34÷52%, что вызвано очень большими неопределённостями исходных данных и указывает на высокий уровень рисков при реализации любой из схем ЯТЦ в РК. Впрочем, более точная детализировка исходных данных (например, предварительные договорённости с поставщиками продукции и услуг) и использование более точных "бизнес моделей" на последующих этапах подготовки к строительству АЭС и расширению национального ядерного топливного цикла существенно снизят риски проектов.

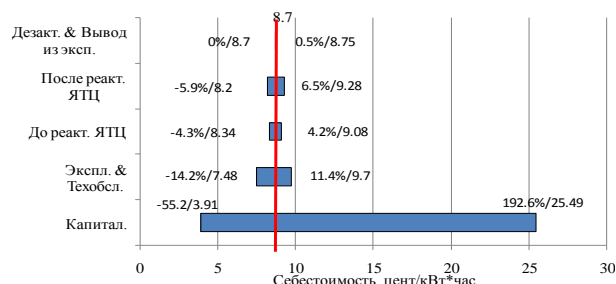
Рисунки 6-8 иллюстрируют чувствительность себестоимости к изменению технико-экономических показателей определённых компонентов ЯТЦ для всех трёх рассмотренных схем.



*Рисунок 6. Влияние компонентов ЯТЦ на себестоимость электроэнергии. Схема 1*



*Рисунок 7. Влияние компонентов ЯТЦ на себестоимость электроэнергии. Схема 2*



*Рисунок 8. Влияние компонентов ЯТЦ на себестоимость электроэнергии. Схема 3*

Из рисунков видно, что наибольшее влияние на себестоимость электроэнергии оказывают капитальные затраты на строительство АЭС. Столь большой разброс значений капитальных затрат вызван влиянием неопределённостей в значениях двух основных факторов – собственно затрат на строительство (оборудование, персонал, материалы и пр.) и ставки дисконтирования. Так, например, номинальное значение капитальных затрат схемы 3 равно 3.36 цента/кВт\*час, при ставке дисконтирования в 0% (полное государственное финансирование) опускается до значения 0.64 цента/кВт\*час, а при ставке в 15% – поднимается до 7.1 цента/кВт\*час.

Вторые по значимости факторы определяющие себестоимость электроэнергии для каждой схемы оказываются различными. Так в схеме 1 этим фактором является дореакторная часть ЯТЦ, на которую наибольшее влияние оказывают цены на добычу урана и получение из него жёлтого кека. А в схеме 2 на второй план выдвигается послереакторная часть, а именно дорогостоящие модули водной переработки ОЯТ и производства ядерного топлива.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В процессе выполнения настоящей исследовательской работы был осуществлён сбор исходных данных по современным разновидностям ядерного топливного цикла – видах и технико-экономических характеристиках элементов в него входящих (реакторов, заводов по обогащению топлива, заводов по регенерации топлива, хранилищах и пр.), а также по долгосрочным тенденциям его совершенствования.

Сформулированы критерии и технико-экономические показатели, а также осуществлён выбор моделей для проведения технико-экономических оценок долгосрочного развития энергетического сектора страны на основе внедрения элементов замкнутого ядерного топливного цикла. Определен массив исходных параметров необходимых для работы этих моделей.

Изучены три наиболее возможные долгосрочные стратегии развития ядерного энергетического сектора республики с учетом сооружения и эксплуатации элементов замкнутого ядерного топливного цикла, исходя из которых определены расчётные схемы, описывающие состав и принципы взаимодействия элементов ЯТЦ.

Произведён расчёт технико-экономических показателей для каждой схемы и анализ чувствительности этих показателей к изменениям в исходных параметрах.

В результате проделанной исследовательской работы можно сделать следующие выводы:

- анализ ежегодных потоков ядерно- и радиационно-опасных материалов для каждой из трёх схем показывает, что наибольшее количество ВАО образуется в схеме 1 (~39 тонн в виде неразделанных тепловыделяющих сборок (ТВС) с ОЯТ), а наименьшее в схеме 3 (~11.5 тонн, из них 2.5 тонны в виде остеклованных долгоживущих продуктов деления, а 9 тонн в виде металла, полученного из оболочек твэлов и элементов ТВС, и требующего существенно меньших затрат на обращение и захоронение по сравнению с ТВС с ОЯТ). Таким образом, открытый топливный цикл (схема 1) проигрывает перед другими видами рассмотренных ЯТЦ с точки зрения экологической безопасности при захоронении РАО;

- расчёты себестоимости производимой электроэнергии для каждого из трёх вариантов ЯТЦ при номинальных значениях параметров показывают, что предпочтение не может быть отдано какой-либо из схем, поскольку их значения оказываются близки и лежат в диапазоне от 4.6 до 5.2 цент/кВт·час. Однако проведённый статистический анализ свидетельствует, что наихудший результат наблюдается у замкнутого цикла (схема 3, 8.7 цент/кВт·час), а схе-

мы 1 и 2 оказываются практически равны (соответственно, 6.1 и 6.4 цент/кВт·час).

- анализ чувствительности себестоимости электроэнергии к изменению технико-экономических показателей определённых элементов ЯТЦ показывает, что наибольшее влияние на себестоимость оказывает неопределённость в значениях капитальной составляющей, вызванной, в свою очередь, влиянием неопределённостей в значениях двух основных факторов – собственно затрат на строительство и ставки дисконтирования. Вторыми по значимости факторы определяющие себестоимость электроэнергии для каждой схемы оказываются различными: в схеме 1 этим фактором является дореакторная часть ЯТЦ, на которую наибольшее влияние оказывают цены на добычу урана и получение из него жёлтого кека, в схеме 2 на второй план выдвигается послереакторная часть.

Таким образом, из проделанной работы следует, что окончательный выбор той или иной схемы развития ядерной энергетической отрасли республики может быть сделан только после того как будет однозначно определена национальная политика в области захоронения ОЯТ, поскольку самый экономически выгодный вариант ЯТЦ оказывается наиболее ядерно- и радиационно-опасным, возлагая на будущее поколение граждан необоснованное бремя по конечной утилизации ядерных отходов.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Viability Assessment of a Repository at Yucca Mountain, Volume 3: Total System Performance Assessment: DOE/RW-0508. – 1998. – дек.
2. Sailor, W. C. Comparison Of Accelerator-Based With Reactor-Based Nuclear Waste Transmutation Schemes. Progress in Nuclear Energy 28 / W. C. Sailor, C. A. Beard, F. Venneri and J.W. Davidson. - 1994. - 359 с.
3. The Economics of Reprocessing vs. Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel / M. Bunn [et al]. - Nucl. Tech., 2003. -150 с.
4. Peterson, P. F. The Pros and Cons of Nuclear Fuel Recycling / P. F. Peterson, F.N. von Hippel // Science – 2001. -7 дек. - 2093-2094 (in Letters).
5. Resources, Production and Demand (The Red Book): OECD Nuclear Energy Agency, Uranium 2007. - OECD/NEA-IAEA. – 2008.
6. U.S. Department of Energy, Energy Information Administration, Uranium Industry Annual, Office of Coal, Nuclear, Electric and Alternate Fuels, U.S. Department of Energy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.eia.doe.gov/fuelnuclear.htm>, свободный. – Загл. с экрана.
7. Analysis of Uranium Supply to 2050: International Energy Agency. – 2001.
8. Lorance, R.B. Basic techniques for analyzing and presentation of cost risk analysis / R.B. Lorance, R.V. Wendling: AACE International Transactions. - Association for the Advancement of Cost Engineering International. – 1999.

### **ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ЭНЕРГЕТИКА САЛАСЫН ДАМУҒА АРНАЛҒАН ЯОЦ ӘРТҮРЛІ ТИПТЕРІН ЕНГІЗУДІҢ ТИІМДІЛІГІН БАҒАЛАУ**

**Кукушкин С.М., Мүкенева С.А., Тур Е.С., Цынгаев В.М.**

*Қазақстан Республикасының Ұлттық Ядролық Орталығы, Курчатов*

Осы зерттеу жұмысын орындау барысында тұйық ядролық отын циклінің қазіргі заманғы әркілі түрлері – оған кіретін элементтердің (отын байытатын реакторлардың, зауыттардың, отынды регенерациялайтын зауыттардың, қоймалардың т.б.) түрлері мен техника-экономикалық сипаттамалары бойынша, сондай-ақ оны жетілдірудің ұзақ мерзімді бағыттары бойынша бастапқы деректер жинау жүзеге асырылды.



Өлшемдер мен техника-экономикалық көрсеткіштер тұжырымдалды, сондай-ақ еліміздің энергетикалық секторының тұйық ядролық отын циклінің элементтерін енгізу негізінде ұзақ мерзімді дамытуды техника-экономикалық бағалауға арналған үлгілерді таңдау жүзеге асырылды. Бұл үлгілердің жұмысына қажетті бастапқы параметрлер топтамасы анықталды.

Тұйық ядролық отын циклінің элементтерін құру және пайдалану ескеріле отырып республиканың ядролық энергетика секторының үш неғұрлым ықтимал ұзақ мерзімді стратегиясы зерделенді, олардың негізінде ЯОЦ элементтерінің өзара әрекеттесу принциптері мен құрамын сипаттайтын есептік сұлбалар анықталды.

Әрбір сұлбаға арналып техника-экономикалық көрсеткіштер есептелді және осы көрсеткіштердің бастапқы параметрлердегі өзгерістерге сезімталдығы талданды.

## **ANALYSIS FOR EFFECTIVENESS OF INTRODUCTION OF DIFFERENT NUCLEAR FUEL CYCLES FOR NATIONAL NUCLEAR INDUSTRY DEVELOPMENT**

**S.M. Kukushkin, S.A. Mukeneva, E.S. Tur, V.M. Tsyngaev**

*National Nuclear Centre of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov*

In process of the research work, initial data are collected for the present-day variety of closed nuclear fuel cycle – types and cost performance characteristics of its elements (reactors, fuel enrichment plants, fuel reprocessing plants, storages, etc.), as well as for long-term trends of its improvement.

Criteria and cost performance are defined, and models are selected for feasibility study of long-term development of nuclear power sector based on introduction of closed nuclear fuel cycle elements. A package of initial parameters is determined required for the operation of the models.

Studied are three the most possible long-term strategies of nuclear power development in the republic taking into account construction and operation of closed nuclear fuel cycle elements. Based on the strategies, calculation models are defined describing composition and interaction principle of NFC elements.

Calculation is performed of cost performance index for each model, as well as sensitivity analysis of the indices to the change of initial parameters.

УДК 550.8.053

**ПРИМЕНЕНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАЗРЕЗОВ**

Перепёлкин А.И., Баранов С.А.

*Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатова*

В процессе выполнения настоящей исследовательской работы была осуществлена классификация данных пробоотбора, сделанных на площадке “Балапан”. Отработан алгоритм построения геологических разрезов с помощью современных программ. Создан ГИС-проект и геологическая карта площадки “Балапан”.

**ВВЕДЕНИЕ**

Главной задачей геологических исследований, является изучение геологических тел (их формы, состава и свойств), взаимоотношений, зависимостей и процессов между ними на различных уровнях иерархии — от микроскопического до масштабов всей планеты — за интервал времени, прошедший с момента образования Земли.

Раздел геотектоники, называемый структурной геологией, занимается формой и пространственным положением геологических тел, явившихся как следствие деформаций в горных породах. Одним из основных направлений в структурной геологии является изучение структурного состояния горных пород и участков коры, что достигается посредством рассмотрения геологических разрезов и структурного анализа геологических карт, позволяющих устанавливать пространственные соотношения дислокаций.

Построение геологических разрезов позволяет получить представление о поведении геологических тел под поверхностью Земли. При составлении разреза геологи используют те немногочисленные сведения, которые получены в результате геолого-съемочных работ (сведения о положении стратиграфических границ подразделений, измеренные в обнажениях элементы залегания горных пород и т.д.). Также могут использоваться данные бурения, геофизики и других видов геологических работ. Даже при хорошей изученности района исследований, перед геологом стоит достаточно сложная задача, заключающаяся в том, чтобы интерполировать поведение геологической структуры на том пространстве, где нет непосредственных замеров положения структурных элементов. Вследствие чего, на результирующий геологический разрез существенное влияние оказывают представления о структуре того или иного специалиста.

Такое положение дел вряд ли можно оправдать, даже если автор разреза имеет огромный опыт и интуицию. Сам факт, что геолога в этом случае можно назвать автором, говорит о том, что разрез является скорее результатом творчества и не может восприниматься как геологический документ. При ручной обработке имеющихся данных, математические методы, позволяющие производить интерполяцию, слишком трудоемки. Поэтому специалисты предпочитают рисовать разрез от руки, используя главным

образом свое профессиональное чутье. При этом часто учитывается только та информация, которая на карте находится вблизи линии разреза, что является добровольным сужением базы структурных данных и отражается на результате построений.

Тем не менее, существуют математические методы, которые могут и должны быть применены при построении геологического разреза. Это в первую очередь точные геометрические построения, которые при введении системы координат могут быть заменены аналитическими выражениями. Здесь также могут быть применены широко распространенные и активно используемые в других направлениях геологической науки методы статистического анализа. Иными словами, геологический разрез должен представлять собой результат совершения воспроизводимых операций над конечным множеством значений измеряемых величин, а также должна иметься возможность проверки легитимности полученного разреза. К сожалению, на настоящем этапе развития геологической науки об этом говорить не приходится.

Причиной этому может служить то обстоятельство, что на данный момент не существует общего подхода, алгоритма построения разреза, то есть мы не имеем последовательности действий, которые необходимо совершить для достижения качественного, лишённого совсем или, по крайней мере, большей части субъективных представлений, точного, насколько это возможно, и проверяемого результата.

Развитие информационных технологий позволяет задавать математически точную среду для анализа специалистом-геологом имеющейся структурной информации и синтеза новой. Поскольку применение математических методов требует значительных вычислительных ресурсов, естественным будет применение ГИС-систем в качестве своеобразной настольной исследовательской лаборатории.

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИНСТРУМЕНТЫ**

Сфера применения математики в геологических исследованиях расширяется с каждым годом. Повышенный интерес к математическим методам связан с необходимостью обобщать и анализировать фактический материал, накопленный в результате многолетних исследований. Этому способствует также бурное развитие средств вычислительной техники, позволяющей хранить, извлекать, передавать и обрабатывать большие объемы информации. Предпо-

лагается, что применение компьютерных технологий в обозримом будущем обусловит переход геологии на качественно новый уровень. В связи с этим необходимы знания и навыки, позволяющие геологу правильно сформулировать задачу, оценить возможности предлагаемых способов ее решения и грамотно интерпретировать результаты.

Между тем в большинстве книг и учебников, посвященных математическим методам в геологии, обычно рассматривается только статистический анализ данных, что резко сужает сферу применения математики для решения геологических задач. Кроме того, предлагаемые в них способы решения ориентированы на применение статистических таблиц и ручной счет. В настоящее время, при наличии доступных и простых в использовании персональных компьютеров, это явный архаизм.

Математическое решение практических задач в геологии из потока несвязанных друг с другом исследований еще в начале двадцатых годов прошлого столетия превратилось в определенное научное направление, названное математизацией геологии. В конце тридцатых годов двадцатого века оно стало перерастать в самостоятельную науку, для которой до сих пор предлагаются различные термины: аналитическая геология, теоретическая геология, статистическая геология, геостатистика, геоматематика, математическая геология и др.

Суть математизации геологии заключается в записи геологических высказываний в терминах и символах математики и вычислении различных показателей, предназначенных служить основаниями для интерпретации этих записей. Но, останавливаясь лишь на статистике, мы ограничиваем сферу применения статистических методов в геологии.

Термин «математическая геология» означает использование в геологии методов не одной только теории вероятностей, но и многих других математических наук - геометрии, алгебры, теории множеств, топологии и т.п. Данный термин является наиболее подходящим, дающим представление об области применения математических методов при решении геологических задач.

Поскольку данная работа посвящена проблеме построения геологических разрезов, то есть структурных построений, для которых основной базой является геометрия геологических структур, следует рассмотреть применение математических методов при решении структурно-геологических задач.

Что касается геометрического моделирования с применением компьютеров в структурной геологии, здесь следует сказать, что в целом данное направление развито слабо. Как правило, большинство работ представляют собой описание того, как производились те или иные структурные построения для какого-либо конкретного геологического объекта. Не наблюдается какого-либо единого подхода к построению,

единой базы данных и непосредственно разрезов геологической науке.

Геологический разрез показывает соотношение геологических тел под земной поверхностью и вместе с геологической картой отражает объемное строение изучаемого региона. Однако при составлении разреза геолог обычно имеет весьма ограниченный объем информации о поведении геологических объектов на глубине, и по этой причине, для построения геологически реалистичного и геометрически непротиворечивого разреза, необходимо применение точных методов, описанных в литературе по структурной геологии. Тем не менее, существующие точные методы построения геологических разрезов или чрезмерно трудоемки, или могут быть применены лишь для весьма ограниченного числа структурных обстановок, и построение разреза по картам масштабов от 1:200000 до 1:25000 в большинстве случаев производится исходя из опыта и личных представлений геолога. Поэтому необходимо спроектировать математически строгий подход, который позволит автоматизировать процесс построения геологических разрезов. При этом алгоритм должен обеспечить:

- построение геологического разреза на основании только формальных критериев;
- возможность беспристрастной оценки той структурно-геологической информации, какой мы в действительности обладаем;
- возможность увеличения детальности геологической структуры при появлении новой структурной информации;
- возможность проверки корректности построений.

Процесс построения геологического разреза по заданной линии на геологической карте в основе своей процесс творческий, мало поддающийся формализации. Вместе с тем, при построении разреза используется целый ряд геометрических характеристик, которые являются каркасной основой и его неотъемлемой атрибутикой. К ним относятся линия рельефа дневной поверхности, точки пересечения линии разреза с границами геологических образований, графики изменения физических полей (магнитного и гравитационного) вдоль линии разреза и др.

До недавнего времени все эти характеристики измерялись на отпечатанных картах с помощью линейки и циркуля, масштабировались и вычерчивались вручную. После этого готовый разрез сканировался, векторизовался и компоновался к соответствующей карте.

Применение ГИС технологий при разработке графических приложений позволило использовать свойства векторной графики для формирования основы геологического разреза, на которую вынесены его геометрические элементы. Отметим, что в качестве ГИС программы была использована программа ArcGIS, поэтому все, что касается векторной графики, будет пониматься именно в понятиях этой программы.

Как известно, растровые изображения напрямую выводятся на экран монитора, поскольку в таких файлах содержится вся необходимая информация для прорисовки. Теперь мы имеем растровый файл с геологической картой и можем просматривать его с помощью различного программного обеспечения предназначенного для этого. Среди наиболее удобных приложений данного типа можно отметить программу ACDSee. Растровый файл описывает цвет, яркость, степень прозрачности для каждой точки в прямоугольной области изображения, отображая тем самым непрерывно изменяющиеся свойства интересующего нас объекта (поисковой площади, экологического полигона и др.). Графические данные описываются в поле сетки из столбцов и строк набором ячеек (пикселов) с уникальными значениями. Растровые описания графики группируются в четыре класса: монохромные (Monochrome images), псевдоцветные (Pseudocolor images), в градациях серого (Grayscale images), истинно цветные (True color/multiband images).

Отсканировав нужную нам карту, мы не сможем сразу указать компьютеру, например, на какую либо линию на нашей карте, поскольку для него такого объекта пока не существует. А раз так, то нам не удастся и обратиться к такому объекту. Все, что мы сможем сделать, это просмотреть или задать какие-либо из свойств, для какого-то множества точек изображения. Чтобы иметь возможность работать с геометрическими объектами, необходимо векторизовать наш файл.

Векторизовать растровый файл можно разными способами. Для этого существует множество программ, в частности в РГП НЯЦ РК имеется программа Easy Trace, которая позволяет проводить векторизацию растровых карт, как в ручном, так и в полуавтоматическом режиме (в зависимости от конкретной ситуации). Форматы векторных файлов, в которых сохраняются результаты, поддерживаются многими приложениями. К тому же существует достаточно большое количество служебных утилит, конвертирующих файл из одного формата в другой.

В векторном файле описываются уже не свойства точек изображения, а графические объекты. Все объекты состоят из базовых геометрических фигур — примитивов, для которых задаются координаты их вершин. Такими примитивами могут быть: точка, отрезок, ломаная, треугольник, эллипс и т.д. В дальнейшем с их помощью могут быть получены любые сложные изображения посредством комбинации различных примитивов. Векторная графика содержит лишь описание объектов для прорисовки. К примеру, чтобы описать отрезок достаточно лишь знать координаты двух точек - начала и конца отрезка, а все точки, лежащие между ними, будут вычислены и прорисованы на экране программой, предназначенной для работы с векторной графикой. Здесь кроется причина меньшего размера векторных файлов в сравнении с растром. Но главное отличие между растровым и векторным форматами заключается в

следующем: векторный формат с помощью соответствующих программ обеспечивает гибкость работы с объектами, описанными в файле — давая нам возможность перемещать, копировать и удалять отдельные вершины и целые геометрические объекты, а также изменять их размеры, форму и т.д.

Определим теперь, какие данные на геологической карте нам необходимо векторизовать. Для определения геометрических характеристик разреза могут при необходимости использоваться следующие карты векторного представления: топографическая основа, в частности, ее слои — изолиний рельефа, гидросети; геологическая карта — слои тектонических нарушений, интрузий, осадочных толщ; карта кайнозойских отложений — слои рыхлых отложений; карты гравитационного и магнитного полей — слои изолиний. Важно, чтобы каждый объект слоя имел атрибутивное значение, определяющее его индивидуальную характеристику. Каждая изолиния рельефа — значение гипсометрической отметки, изолинии физических полей — значение аномального поля и т.д.

Учитывая поставленные перед программой задачи, такими данными являются две системы кривых линий - система геологических границ и системы трещин и разломов. Таким образом, для векторизации геологической карты необходимо задать объекты-кривые. Естественным будет представить кривые как одномерные массивы данных, содержащих информацию об их пространственном расположении.

Многие ГИС программы имеют средства для построения графиков изменения характеристик векторных объектов вдоль заданной линии. Программа ArcGIS не имеет такой опции. Нами был использован способ преобразования векторных объектов в растровые слои (grid и tin) с помощью модулей Spatial Analyst и 3D Analyst, реализующих ряд необходимых дополнительных функций работы с объектами в среде ArcGIS. Для целей построения основы разреза использовалась опция построения профиля для каждого слоя геологической карты. Каждая группа элементов основы разреза определялась с использованием перечисленных выше векторных слоев по заданной линии и затем добавлялась в общую основу.

Обычно разрезы строятся в тех же масштабах, что и геологические карты. Для обзорных разрезов, охватывающих большие пространства, принимают мелкие масштабы. Разрезы под отдельные инженерные сооружения выполняют в крупных масштабах (от 1:100 до 1:500), причем целесообразны одинаковые горизонтальные и вертикальные масштабы. Однако часто, для большей наглядности и для уменьшения длины чертежей, приходится прибегать к увеличению вертикального масштаба по сравнению с горизонтальным. Например, продольный инженерно-геологический разрез по трассе железнодорожной линии обычно строят в горизонтальном масштабе 1:1000, принимая при этом вертикальный масштаб 1:250 (соотношение масштаба 1:4), а при построении подробного продольного

профиля при горизонтальном масштабе 1:1000, вертикальный масштаб принимают равным 1:100 (соотношение 1:10). Следует указать, что использование неодинаковых масштабов расстояний и высот при построении разрезов приводит к неправильному представлению о рельефе местности и искажает природную картину залегания пород.

#### ПОСТРОЕНИЕ РАЗРЕЗА

В настоящее время для создания электронных цифровых карт и графических баз данных используется большое количество программных средств - графических векторных редакторов и GIS (ГИС) - систем (географических информационных систем). ГИС-система - это компьютерная система, которая хранит, организует и отображает данные, описывающие объекты и явления на земной поверхности.

Наиболее универсальными, мощными, многофункциональными являются географические информационные системы ArcGIS - семейство программных продуктов, составляющих геоинформационную систему, основанную на отраслевых стандартах. ArcGIS включает в себя Arcinfo-ArcEditor-ArcView (ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox), для выполнения более глубокого анализа можно подключить дополнительные модули: ArcGIS Geostatistical Analyst и др., а так же пакет разработчика ГИС-приложений MapObjects и серверные приложения ArcSDE, ArcIMS.

#### Подготовка исходных данных

Качественная подготовка исходной информации определяет правильность расчетов при моделировании, поэтому необходимо провести анализ информации, собранной в радиоэкологической базе данных и подготовить ее к дальнейшей работе.

В настоящее время фактическим стандартом систем управления базами данных для персональных компьютеров является СУБД Microsoft Access. Пакет Microsoft Access for Windows является мощным средством управления базами данных, которое поддерживает реляционную модель данных и позволяет создавать сложные приложения на особом диалекте Visual BASIC (VBA). Microsoft Access можно применять для поиска и обработки всевозможных данных, а также для подготовки отчетных документов. Пользовательский интерфейс достаточно прост и предоставляет пользователю удобные возможности для манипулирования базами данных, так что освоение пакета обычно не вызывает сложностей.

Таким образом, база данных реализована в СУБД MS Access, которая является основным средством разработки баз данных для программ семейства ArcGIS, и позволяет хранить как векторные, так и растровые данные (в последних версиях ArcGIS).

Площадка «Балапан» представлена в базе данных пространственными объектами: топографическая основа, геологические и гидрогеологические данные, информация о исследовательских скважинах и прочее. Растровые данные отсканированы (хранятся в виде картинок) и частично переведены в векторный формат

(рисунок 1). Оцифровка карт выполнялась с использованием программы Easy Trace, которая после классификации раstra позволяет выполнить векторизацию изображения в ручном или полуавтоматическом режиме. В базе данных находится 15 слоев растровой и векторной информации, которые в свою очередь содержат более 200 объектов. Подготовлен ГИС-проект, осуществлена привязка растровых изображений к карте и определена их проекция.

Все данные получены в ходе выполнения казахстанских и международных проектов и работ.

Имеющиеся данные проанализированы с целью возможности их использования для задач радиоэкологического мониторинга. Удалена ненужная на данный момент информация. Произведена необходимая выборка данных. В базу данных добавлена необходимая дополнительная информация (рисунок 2).

В атрибутивных таблицах находится следующая информация:

- возраст и генезис;
- глубина подошвы, мощность и отметка подошвы слоя;
- краткое описание горных пород (наименование, состав, цвет, влажность, плотность, консистенция);
- различные типы горных пород с соответствующими условными обозначениями;
- положение уровней подземных вод, а также номера проб грунтов и глубина отбора.

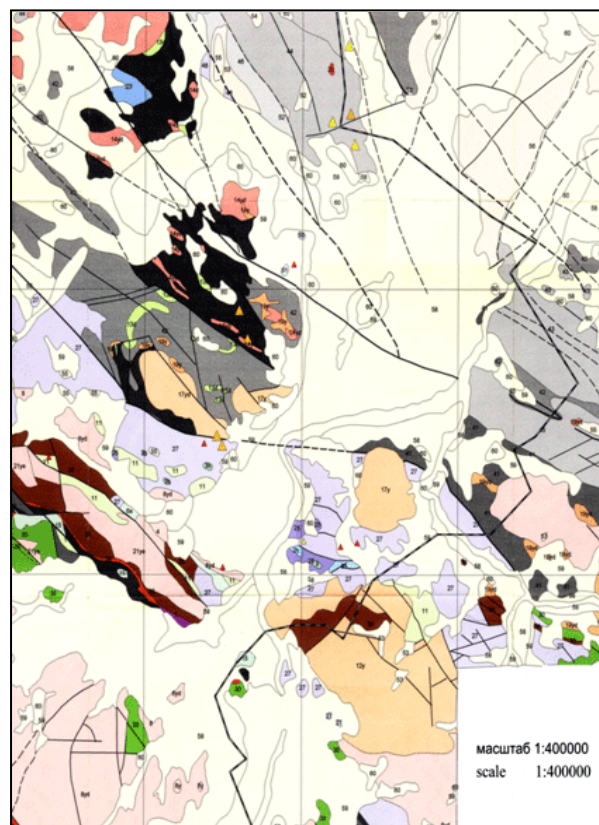


Рисунок 1. Геологическая карта площадки «Балапан»





### Создание растровых карт

По результатам комплексных исследований строятся колонки скважин – вертикальное сечение верхней части земной коры, пробуренное скважиной, с изображением на нем геологических, гидрогеологических и геодезических данных (рисунок 3).

При выполнении работы использованы следующие термины и понятия:

- Геологический разрез – сечение участка земной коры вертикальной плоскостью с изображением на нем геологических факторов, характеризующих взаимное расположение слоев горных пород и условия их обводнения.
- Колонка буровой скважины – вертикальное сечение верхней части земной коры, пробуренное скважиной, с изображением на нем геологических, гидрогеологических и геодезических данных.
- Скважина – цилиндрическая выработка, пройденная буровым инструментом в горных породах.

- Шурф – вертикальная горная выработка квадратного, прямоугольного или круглого сечения (дудка), проходимая с поверхности земли.
- Кровля слоя – поверхность, ограничивающая слой сверху при его нормальном залегании.
- Подошва слоя – поверхность ограничивающая слой внизу при нормальном его залегании.
- Появившийся уровень воды – абсолютная отметка или глубина от устья скважины на которой зафиксирована жидкость во время бурения скважины.
- Установившийся уровень воды – абсолютная отметка или глубина от устья скважины на которой держится уровень жидкости в скважине в течение длительного времени.

По результатам полученных данных определяем дневную поверхность (рельеф местности) и строим точечный слой (тему), содержащий эту информацию. Затем строим точечную тему для первого геологического слоя.

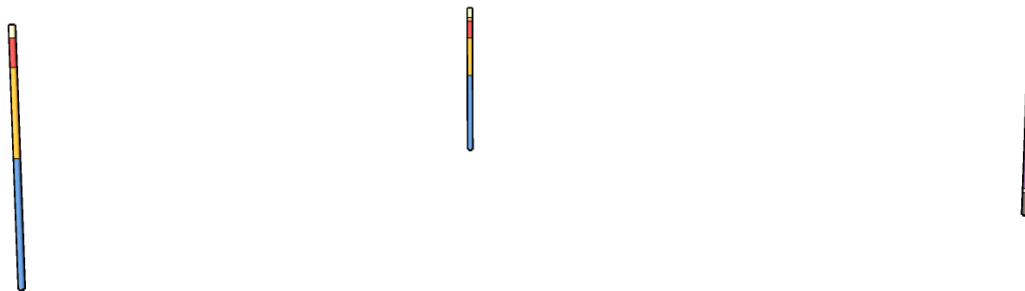


Рисунок 3. Колонки скважин, необходимые для построения разреза

Аналогично ведется построение второго, третьего и остальных геологических слоев на разрезе. Если в одной скважине присутствует определенная порода, а в соседней отсутствует, это означает, что в интервале между скважинами она выклинивается. Для построения разреза также готовится информация об инженерно-геологических процессах и явлениях и других, имеющихся данных, при наличии подземных вод необходимо показать их уровень и напор.

### ГИС-проект «Балапан»

После подготовки векторных и растровых данных необходимо создать ГИС-проект территории, для которой будет проведен весь комплекс расчетов для построения геологического разреза (рисунок 4).

Полученные данные представляют собой точечные объекты, содержащие информацию о местоположении и значении измеряемого параметра. Сетка отбора проб обычно неравномерная – район, вызывающий наибольший интерес исследуется достаточно детально, остальная территория – более грубо. Все это не позволяет «прямо в лоб» построить растровые поверхности с приемлемой точностью.

Поверхность может быть построена средствами ArcGIS (дополнительные модули Geostatistical Analyst или Spatial Analyst), а также с помощью любой другой программы, позволяющей построить растровую поверхность на основе данных точек проб отбора. Нужно заметить, что для использования дополнительных модулей для ArcGIS, сначала необходимо купить лицензии на их использование, и это удовольствие может позволить себе далеко не каждая организация (стоимость каждого модуля около 3000 долларов США). Поэтому нам было удобнее использовать те программы, которые уже имеются в нашей организации (программа SURFER).

Однако при таком подходе возникают проблемы, связанные с проекцией раstra. Обычно программы сторонних производителей строят поверхности, используя не географические, а метрические координаты точек, поэтому информация о проекции не сохраняется. При экспорте таких карт в ArcGIS необходима дополнительная работа по привязке растрового слоя, при которой возможна значительная потеря точности.

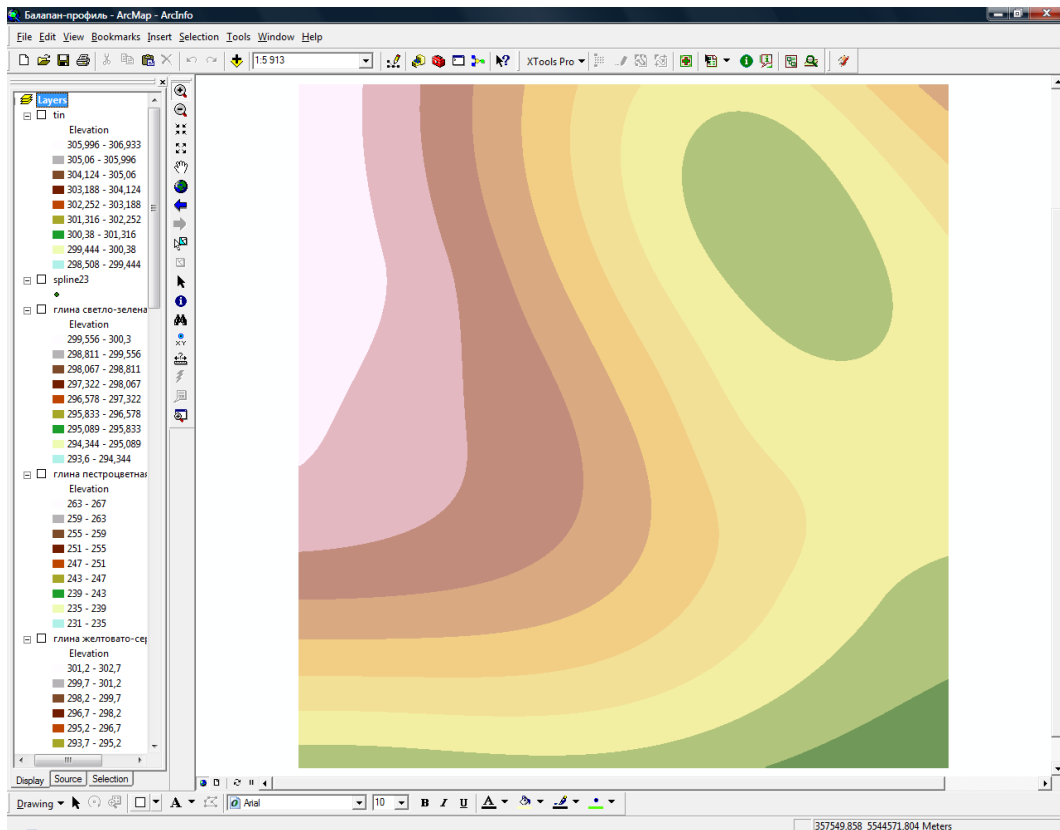


Рисунок 4. Окно ГИС-проекта «Балапан»

Для решения этой проблемы разработан следующий алгоритм. Сначала нужно экспортировать точечную поверхность в текстовый файл, используя стандартные инструменты ArcGIS (Export to XYZ). Затем импортируем данные в программу SURFER, которая имеет большие возможности для построения поверхностей. Готовый растр преобразуем и импортируем в ArcGIS. Такой способ гарантирует сохранение информации о поверхности, а программа SURFER позволяет построить поверхность более правильно.

Размер пиксела (ячейки) раstra определяется при построении поверхности. Но делать его меньше среднего шага отбора проб не имеет смысла, так как это не позволяет реально повысить точность построения карты.

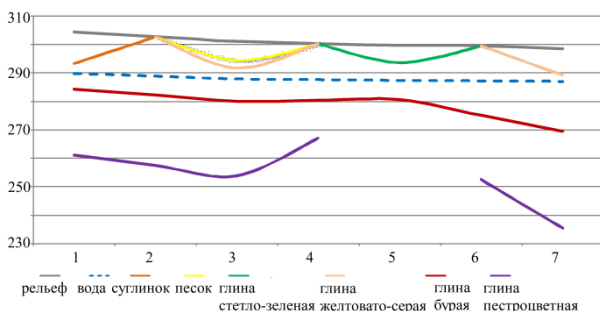


Рисунок 5. Профили геологических слоев и уровень грунтовых вод

В дальнейшем в приложении 3D Analyst строятся линии профилей для каждого геологического слоя (рисунок 5). При необходимости все данные могут быть импортированы в программу для трехмерной визуализации ГИС-объектов SketchUp от компании Google. В этой программе объекты могут быть отображены в виде, необходимом пользователю, и имеется возможность построения различного рода сечений.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процедура построения геологического разреза может быть автоматизирована с помощью применения программы ArcGIS, которая позволяет производить операции над исходными данными (геологическая карта и дополнительная информация о взаимном положении структурных элементов).

В процессе работы алгоритма формируется математическая модель исследуемой геологической структуры – ее каркас, представленный системой растровых данных, которая может быть изменена и уточнена за счет появления новых структурных данных. Модель может быть использована для решения других структурно-геологических задач. Численная природа модели обеспечивает возможность количественной оценки тех или иных параметров геологической структуры.

Дальнейшее изучение вопросов, связанных с применением вычислительных средств и информационных технологий для решения задач структурно-геологических построений, представляется весьма

перспективным. При тех возможностях, которые обеспечивает сегодня компьютерная графика, достаточно реалистичной выглядит попытка создать программное обеспечение, позволяющее работать сразу с объемным изображением геологической структуры, которую можно будет посмотреть в любом положении. В дальнейшем к такой трехмерной системе можно присоединить базу данных, содержащую какие-либо пространственные данные, которые можно отобразить на объемной модели и изучить их распределение. Таким образом, получится нечто наподобие трехмерной ГИС, специализированной для геологических нужд.

Необходимо отметить, что имеется ряд проблем, с которыми мы столкнулись при выполнении работы. Главная из них заключается в малом количестве исходных данных. Та информация, которая имеется по данным бурения, картам, схемам и в сопроводительной к ним документации, часто весьма скудна для того, чтобы обеспечить точный расчет положения структурных элементов под поверхностью Зем-

ли. Недостаточное количество высококвалифицированных специалистов не в состоянии обработать большие объемы архивной информации, поэтому она часто лежит мертвым грузом. А буровые работы в виду своей высокой стоимости, проводятся в небольшом количестве и не позволяют получить нужное количество данных.

При таком положении дел опыт и интуиция геолога часто являются единственным гарантом правильной интерпретации геологической структуры. Выход в такой ситуации представляется в создании специализированной программной среды на основе ГИС-технологий для построения объемной модели структуры исследуемых районов, в которой геолог будет производить построения при всех заданных сведениях о структуре, которые удалось получить в поле. Такой метод работы с информацией позволит геологу принимать решение о том, где располагается та или иная геологическая граница в диапазоне возможных ее положений, который определен имеющейся в распоряжении информацией о структуре.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Booth, B. Getting Started with ArcGIS™: ArcGIS™ 8 User Guide./ B. Booth, A. Mitchell. — GIS by ESRI™, 2001. — 254 p.
2. Vienneau, A. Using ArcCatalog™: ArcGIS™ 8 User Guide./ A. Vienneau. — GIS by ESRI™, 2001. — 288 p.
3. Minami, M. Using ArcMap™: ArcGIS™ 8 User Guide./ M. Minami. — GIS by ESRI™, 2001. — 530 p.
4. Shaner, J. Editing in ArcMap™: ArcGIS™ 8 User Guide./ J. Shaner, J. Wrightsell. — GIS by ESRI™, 2001. — 230 p.
5. Трифонова, Т.А. Геоинформационные системы и дистанционное зондирование в экологических исследованиях: Учебное пособие для вузов./ Т.А. Трифонова, Н.В. Мищенко, А.Н. Краснощеков.— М.: Академический Проект, 2005. — 352 с.

## ГАЖ-ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ГЕОЛОГИЯЛЫҚ ҚИМАЛАРДЫ ҚҰРУДА ҚОЛДАНУ

Перепёлкин А.И., Баранов С.А.

*Қазақстан Республикасының Ұлттық Ядролық Орталығы, Курчатов*

Аталмыш зерттеу жұмысын орындау барысында «Балапан» алаңынан алынған сынамалардың деректерін топтастыру жүзеге асырылды. Қазіргі заманғы бағдарламалардың көмегімен геологиялық қималар құру алгоритмі пысықталды. «Балапан» алаңының ГАЖ-жобасы және геологиялық картасы жасалды.

## GIS-TECHNOLOGIES APPLICATION FOR GEOLOGICAL SECTION CONSTRUCTION

A.I. Perepelkin, S.A. Baranov

*National Nuclear Centre of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov*

During current research work classification of sampling data is carried out at *Balapan* site. Algorithm is developed for geological sections construction using advanced programs. GIS-Project and geological map of *Balapan* site are developed.

УДК 577.4:577.391:504.53:539.16

**ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ЛУГОВЫХ ПОЧВАХ  
ЭКОСИСТЕМЫ ШТОЛЬНИ № 176 ПЛОЩАДКИ «ДЕГЕЛЕН»**

Кабдыракова А.М., Ларионова Н.В., Лукашенко С.Н., Магашева Р.Ю.

*Институт радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

В работе приводятся результаты исследования форм нахождения техногенных радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в луговых почвах экосистемы водотока штольни №176 испытательной площадки «Дегелен» бывшего Семипалатинского испытательного полигона. Выявлено, что, несмотря на пространственное ограничение исследуемой экосистемы и идентичность иных условий, например, таких как тип почвы, природно-климатические условия, существует значительная вариация содержаний форм нахождения радионуклидов в почве. Показано, что в почвах исследуемой экосистемы преобладающей формой для  $^{137}\text{Cs}$  является прочносвязанная, для  $^{90}\text{Sr}$  – обменная. В результате проведенного корреляционного анализа оценено возможное влияние физико-химических свойств исследуемых почв на содержание форм нахождения радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ .

**ВВЕДЕНИЕ**

Ряд фактов, выявленных в результате многолетних радиоэкологических исследований штолен с водопоявлениями горного массива Дегелен, проведенных Институтом радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК, послужили основанием для начала изучения форм нахождения радионуклидов в почве, так как являлись косвенными показателями их прочности закрепления и биологической доступности, и как следствие, способности участвовать в миграционных процессах. Во-первых, результаты радиологических обследований штолен с постоянными и временными водотоками показали, что радионуклид  $^{90}\text{Sr}$  переносится на более значительные расстояния, нежели  $^{137}\text{Cs}$  [1, 2]. Это являлось свидетельством о нахождении первого в почве преимущественно в подвижных формах, обуславливающих его большую миграционную способность, что подтверждалось данными из литературных источников. Во-вторых, показателем степени биологической подвижности радионуклидов послужило распределение данных радионуклидов в системе «почва-растение». Результаты исследования параметров накопления радионуклидов растениями лугового биогеоценоза зоны влияния водотока одной из водоносных штолен (№ 176), показали, что средние значения коэффициентов накопления (Кн)  $^{90}\text{Sr}$  в отличие от  $^{137}\text{Cs}$  смещены в сторону больших величин, что может зависеть наряду с иными факторами, и от соотношений форм нахождения данных радионуклидов в почве. В-третьих, несмотря на относительно небольшую площадь исследованной территории диапазон значений Кн радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  варьировал в неожиданно широких пределах. Причем вариация Кн  $^{137}\text{Cs}$  лежала в более широком диапазоне значений, чем Кн  $^{90}\text{Sr}$  (для радионуклида  $^{90}\text{Sr}$  он составлял один порядок, для  $^{137}\text{Cs}$  достигал трех) [3].

Данный факт, по нашему мнению, может являться показателем того, что содержание форм нахождения радионуклидов в почве также может характеризоваться некоторой вариативностью.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**Объект исследования.** В качестве объекта исследования выбиралась экосистема штольни № 176, приуроченного к правому притоку долины ручья Байтлес в южной части низкогорного массива Дегелен. Исследуемая территория представляет собой левостороннюю часть долины притока, отделенную от основного русла небольшим вытянутым по течению повышением с обнажениями скальных пород. Штольня № 176 характеризуется наличием в настоящее время постоянного водотока протяженностью до 1 км, ширина которого, в основном, не превышает 1 м. Исследованиями, проведенными ранее [4], установлено, что среднегодовой дебит водотока штольни № 176 превышает 500 л/мин.

Основным изучаемым компонентом исследуемой экосистемы выбраны луговые почвы.

**Отбор проб.** Вдоль русла водотока по мере удаленности от источника загрязнения - штольни - закладывались 30 исследовательских площадок, с отбором смешанной пробы почвы (рисунок 1).

Смешанная проба почвы состояла из двух или нескольких образцов, отобранных на глубину корнеобитаемого почвенного слоя до скальных пород (20 см). Расстояние между максимально отдаленными исследовательскими площадками составляло около 600 м. Выбор места расположения экспериментальных точек определялся, помимо привязки к руслу водотока, также по месту произрастания некоторых видов растений (пижма, волоснец и шиповник).

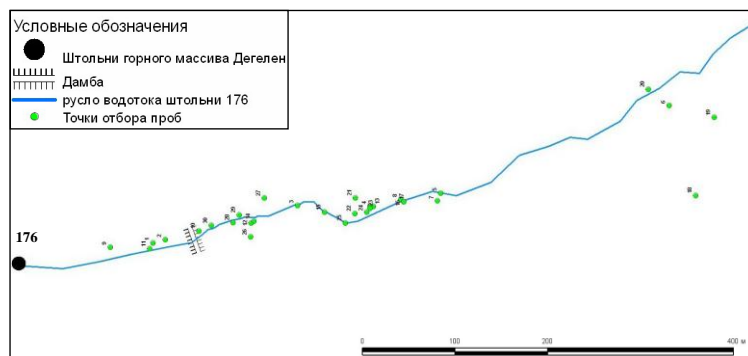


Рисунок 1. Схема расположения исследовательских площадок на исследуемой территории

**Определение физико-химических свойств почв экспериментальных площадок.** Из показателей химических и физико-химических свойств почвы определяли содержание общего гумуса, гранулометрический состав, рН водной вытяжки (актуальная кислотность), сумму обменных оснований, содержание легкорастворимых солей по общепринятым методикам: содержание общего гумуса определяли методом мокрого сжигания органических веществ раствором бихромата калия в серной кислоте и последующим определением количества восстановленного бихромата калия на фотоколориметре [5]. Актуальную кислотность почвы определяли потенциометрическим методом при соотношении почвы и воды (дистиллированной) равным 1:2,5 [6]. Содержание легкорастворимых солей в почве определяли по их сумме в водной вытяжке, полученной при соотношении почва:вода = 1:5 [7]. Сумму обменных кальция и магния определяли вытеснением катионов 1н раствором хлорида натрия с последующим комплексометрическим титрованием [6]. Содержание карбонатов определяли путем разложения их раствором соляной кислоты и измерением добавочного давления от выделившейся углекислоты на кальциметре [8]. Гранулометрический состав почвы определяли пипет-методом, основанным на скорости оседания почвенных частиц в спокойной воде в течение определенного времени [9].

**Выщелачивание радионуклидов из почвы и получение вытяжек.** Формы нахождения радионуклидов в почве определяли методом последовательного выщелачивания из почвы различными реагентами и определением их содержания в полученных вытяжках [10]. Для этого 100 г воздушно-сухой пробы почвы, просеянной через сито диаметром ячейек 1 мм, последовательно обрабатывали различными выщелачивающими растворами и получали соответствующие вытяжки. Соотношение почвы и выщелачивающего раствора во всех этапах эксперимента поддерживалось равным 1:5. Легкодоступные формы радионуклидов извлекали водой (водорастворимая форма) и 1 М раствором уксуснокислого аммония (обменная форма). Подвижные формы радионуклидов, которые только частично могут поглощаться растениями, но представляют их потенци-

ально доступный резерв извлекали 1М HCl. Недоступные растениям фиксированные формы радионуклидов выщелачивали обработкой 6М раствором HCl (рисунок 2).



Рисунок 2. Схема последовательного выделения форм нахождения радионуклидов в почве

Содержание прочносвязанной формы радионуклидов определялось путем математического вычитания от валового содержания радионуклидов в исходной почве суммарного содержания во всех видах вытяжек. Результаты гамма-спектрометрического определения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в пяти остаточных после выщелачивания образцах почвы показали, что значения полученные путем непосредственного измерения и математического вычитания согласуются, расхождение не превышает 15 %.

**Определение радионуклидного состава почвы и вытяжек.** Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в образцах почвы и вытяжках определяли инструментальным гамма-спектрометрическим методом. Минимально детектируемая удельная активность (МДУА) для образцов почвы составляла 0,2 Бк/кг, для образцов вытяжек – 0,11 Бк/л. Относительная погрешность – не более 10%.

Удельную активность  $^{90}\text{Sr}$  в образцах почвы определяли неразрушающим методом - прямым инструментальным измерением эффективной удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  на бета-спектрометре с программным обеспечением «Прогресс», МДУА - 100 Бк/кг, относительная погрешность не превышает 10%.

Объемную активность  $^{90}\text{Sr}$  в образцах вытяжек определяли методом радиохимического анализа по дочернему радионуклиду –  $^{90}\text{Y}$ . Предел обнаружения составил 0,1 Бк/л.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

**Характеристика почв исследуемой экосистемы.**

Исследуемая экосистема характеризуется почвами лугового ряда, почвенный профиль обладает небольшой мощностью (до 40-45 см), ввиду их незначительного по времени периода формирования. В результате лабораторных анализов образцов почвы определены некоторые параметры, характеризующие физико-химические свойства луговых почв (таблица 1).

Как следует из таблицы, исследуемые луговые почвы характеризуются высоким содержанием ор-

ганического вещества (тучные почвы), реакция водных почвенных суспензий редко нейтральная, чаще слабощелочная или щелочная. В условиях промывного водного режима почвы практически не засолены легкорастворимыми солями (сумма солей, за редким исключением, не достигает 0,1 %). Содержание обменных кальция и магния в почвенно-поглощающем комплексе умеренное.

По механическому составу почвы представлены, в основном, легкосуглинистыми и супесчаными разновидностями, реже среднесуглинистыми (по классификации Н.А. Качинского). В составе гранулометрических фракций преобладает фракция крупной пыли, а содержание илистых частиц очень низкое.

Таблица 1. Физико-химические свойства луговых почв экосистемы водотока штольни 176

Почвенная характеристика	интервал	среднее
Концентрация органического вещества, С, %	7 - 23	14
рН водной суспензии (актуальная кислотность)	6,8 – 7,9	7,5
Сумма легкорастворимых солей, %	0,016 – 0,268	0,045
Сумма обменных оснований, мг-экв/100 г	17 – 40	27
Гранулометрический состав: содержание физической глины (частиц почвы размером <0.01 мм), %	15 – 37	23
в том числе:		
илистых частиц (<0.001 мм), %	0,13 – 11	5
мелкой пыли (0.001-0.005 мм), %	0,21 – 12,3	9
средней пыли (0.005-0.01 мм), %	3,3 – 14	9
содержание частиц крупной пыли (0.01-0.05 мм), %	12,6 – 41	29
Удельная активность $^{137}\text{Cs}$ в почве, Бк/кг	26 – 450 000	27 000
Удельная активность $^{90}\text{Sr}$ в почве, Бк/кг	600 – 33 000	12 000

**Оценка вариативности содержания форм нахождения радионуклидов.** Несмотря на то, что исследования проводились в пределах одной пространственно ограниченной экосистемы, одного типа почвы и других, близких к идентичному условиям, существует значительная вариация в содержаниях форм нахождения радионуклидов. Для большей наглядности результаты представлены в виде гистограммы распределения частот встречаемости значений содержания форм нахождения радионуклидов (рисунки 3 и 4).

На рисунке 3 представлена гистограмма распределения результатов по частоте встречаемости значений содержания форм нахождения радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ .

Содержание форм нахождения  $^{137}\text{Cs}$  варьирует в диапазоне следующих значений: водорастворимая - 0,015 - 3,4%, обменная - 1,5-13%, подвижная – 1,8-13%, фиксированная – 10-39% и прочносвязанная – 49-83% от валового содержания радионуклида в почве. Из них, как показывают распределение частот встречаемости значений, наиболее часто встречаемые величины: для водорастворимой формы до 0,1%, для обменной и подвижной от 3 до 6 %, для

фиксированной формы – 20-30%, для прочносвязанной – 70-80%.

Ситуация аналогичного характера наблюдается и в содержаниях форм нахождения  $^{90}\text{Sr}$ . Рисунок 4 демонстрирует гистограмму распределения частот встречаемости значений содержания форм нахождения  $^{90}\text{Sr}$ .

Вариация содержания форм нахождения  $^{90}\text{Sr}$  лежат в пределах следующих величин: водорастворимая – 0,32-5%, обменная – 23-83%, подвижная – 13-51%, фиксированная – 0,6-16% и прочносвязанная – 4-41% от его валового содержания, при этом наиболее часто встречаемые значения наблюдаются в пределах 0,75-1,5%, 40-50%, 20-30%, 3-6%, 20-30% соответственно.

Для оценки вариативности содержания форм нахождения радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  и подкрепления показанных эмпирических распределений целесообразно представить статистические числовые показатели результатов исследования. Наиболее распространенными и показательными из них являются средние значения, среднееквадратическое отклонение и коэффициент вариации (таблица 2).



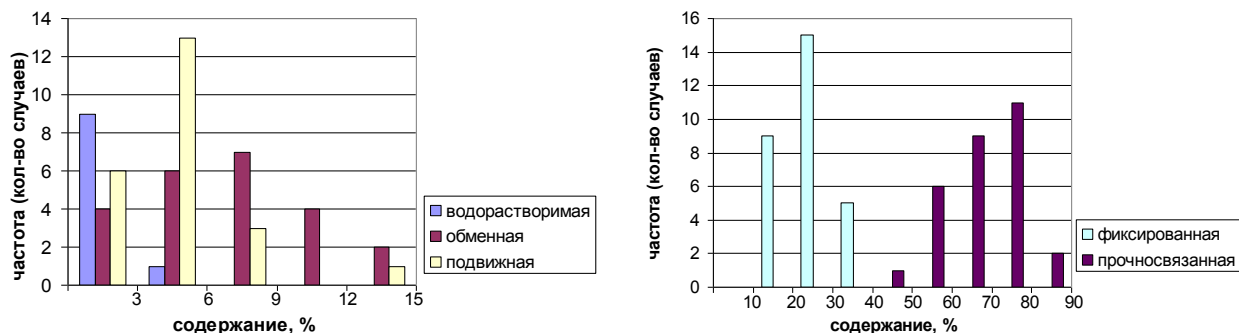


Рисунок 3. Гистограмма распределения частот встречаемости значений содержания форм нахождения <sup>137</sup>Cs

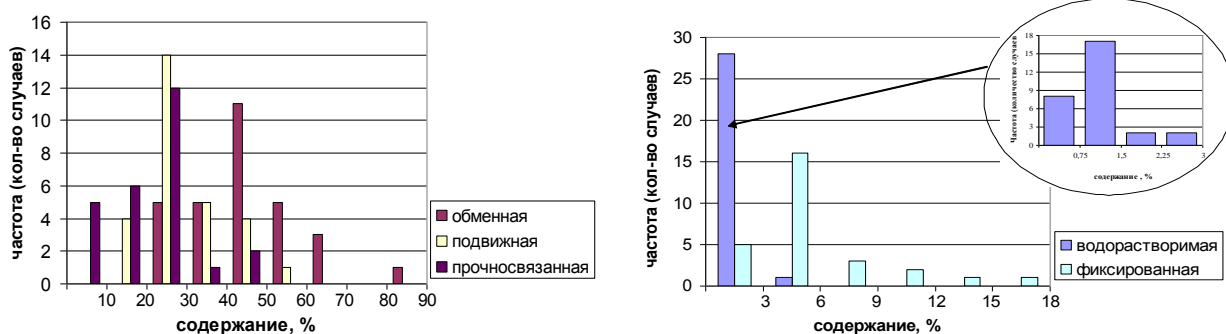


Рисунок 4. Гистограмма распределения частот встречаемости значений содержания форм нахождения <sup>90</sup>Sr

Таблица 2. Обобщенные вариационно - статистические показатели содержания форм нахождения радионуклидов <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr в луговых почвах экосистемы водотока штольни 176

Форма нахождения радионуклида	<sup>137</sup> Cs			<sup>90</sup> Sr		
	A <sub>ср</sub> , %	σ	K <sub>вар</sub> , %	A <sub>ср</sub> , %	σ	K <sub>вар</sub> , %
водорастворимая	0,47	0,34	218	1,2	0,9	74
обменная	6,7	3,6	53	45	13	29
подвижная	4,5	2,3	52	30	9,6	32
фиксированная	24,5	6,7	27	5	3,6	71
прочносвязанная	66,5	9,6	14	20	10	50

Примечание: A<sub>ср</sub> – среднее арифметическое, σ – среднеквадратическое отклонение, K<sub>вар</sub> – коэффициент вариации

Как видно из таблицы, существует значительная вариабельность содержаний в почве форм находений обоих радионуклидов, особенно это выражено в содержаниях водорастворимой формы <sup>137</sup>Cs (K<sub>вар</sub>=218%), и в значительной степени в водорастворимой (K<sub>вар</sub>=74%) и фиксированной (K<sub>вар</sub>=71%) форм <sup>90</sup>Sr.

**Соотношение форм находений радионуклидов <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr.** Сравнительный анализ показывает, что в исследованных луговых почвах экосистемы штольневого водотока соотношение форм нахождения радионуклидов <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr существенно различаются (рисунок 5).

Для <sup>137</sup>Cs характерно извлечение водой незначительной доли из валового его содержания в почве, немногим больше доля обменной и подвижной форм. Основная доля радионуклида находится в прочносвязанной форме.

В отличие от <sup>137</sup>Cs для <sup>90</sup>Sr характерно преобладание легкодоступной (сумма водорастворимой и обменной) и подвижной форм. Доминирующее положение из них занимает обменная форма. Доли фиксированной и прочносвязанной фракций в почве невелики.

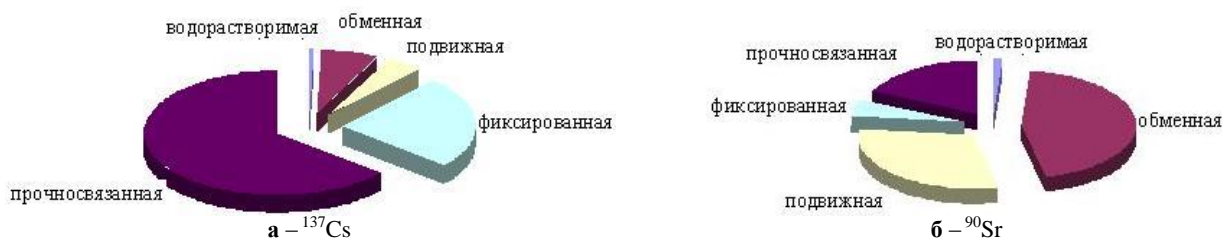


Рисунок 5. Соотношение форм находений радионуклидов <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr

Таким образом, результаты наших исследований согласуются с литературными данными, в которых указывается, что механизмом поглощения  $^{137}\text{Cs}$  в почве, в основном, является необменная сорбция, а радионуклид  $^{90}\text{Sr}$  относится к группе элементов, характеризующихся обменным типом поведения в системе почва-раствор [11, 12].

**Оценка возможного влияния физико-химических свойств луговых почвы на формы нахождения радионуклидов в почве.** Для выявления почвенных характеристик, оказывающих влияние на формы нахождения радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в почве были определены коэффициенты парной корреляции между физико-химическими свойствами почв и относительным содержанием в них форм нахождения радионуклидов.

Полученные коэффициенты корреляции характеризовались абсолютными значениями от 0,1 до 0,5. С точки зрения статистических анализов корреляция между двумя переменными считается значимой, если значения коэффициентов корреляции находятся выше доверительной границы определяемой для  $n$ -го количества проб при  $p=0,95$  [13]. Для исследованного нами количества проб (30) доверительная граница коэффициента корреляции составляла 0,36 по абсолютному значению. На рисунке 6 приведены

графики линейной зависимости для пар, коэффициенты корреляции которых находятся выше доверительной границы 0,36.

Необходимо отметить, что приведенные коэффициенты корреляции могут отражать лишь наличие тенденции слабой корреляционной связи между изучаемыми параметрами, так как их значения являются невысокими. Отмечается слабая положительная связь между содержаниями легкорастворимых солей и водорастворимой формы  $^{90}\text{Sr}$  ( $r=0,5$ ) и между содержаниями в почве частиц крупной пыли и подвижной формой  $^{90}\text{Sr}$  ( $r=0,45$ ). Низкая обратная связь выявлена между содержаниями фракции средней пыли и обменной формы  $^{90}\text{Sr}$  ( $r=-0,37$ ) и между содержаниями частиц мелкой пыли и фиксированной формой  $^{137}\text{Cs}$  ( $r=-0,5$ ). Наблюдаемая тенденция корреляционной связи между гранулометрическими фракциями почвы различных размеров - крупно-, средне- и мелкопылевыми частицами и формами нахождения радионуклидов в почве, вероятнее всего является опосредованным показателем влияния иных «скрытых» факторов, например минералогического состава этих фракций, которых мы на данном этапе выполнения работы еще не рассматривали.

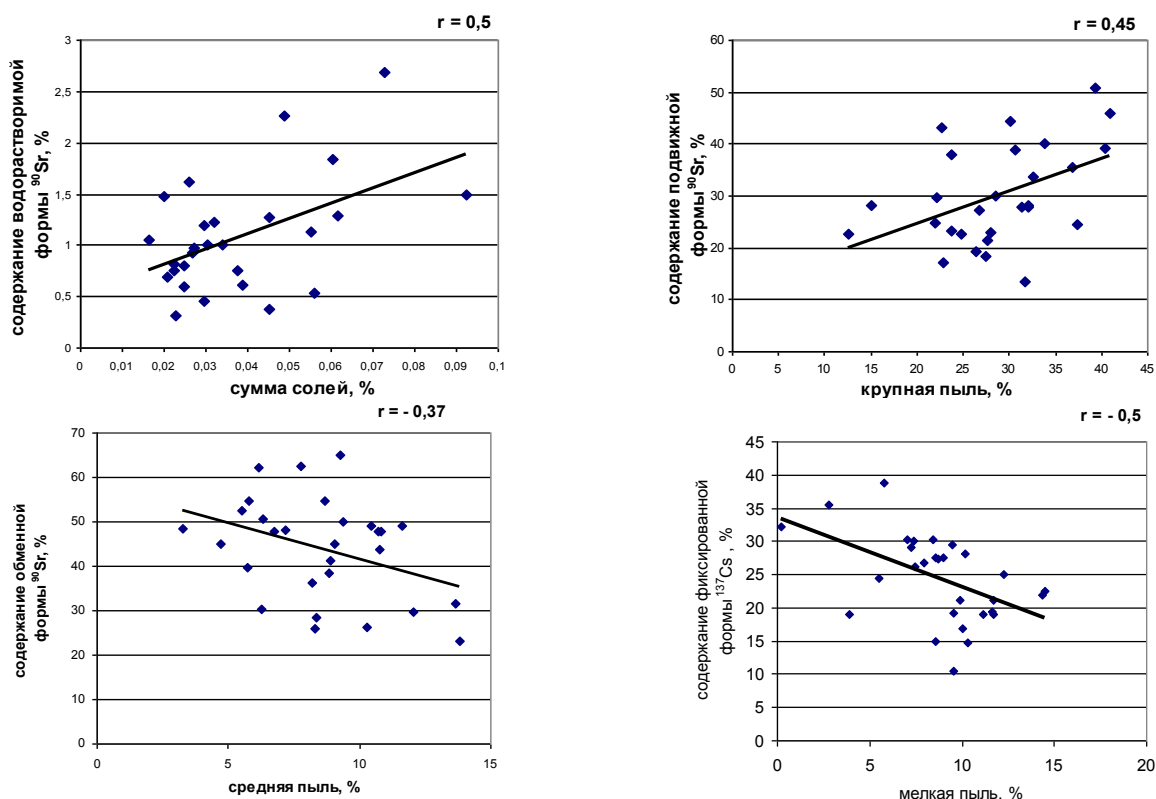


Рисунок 6. Графики линейной зависимости и коэффициенты корреляции между физико-химическими характеристиками луговых почв и относительным содержанием в них форм нахождения радионуклидов

### Выводы

В результате проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. В пределах одной пространственно ограниченной экосистемы, единого типа почвы и при идентичности прочих условий содержание форм нахождения техногенных радионуклидов в луговой почве варьирует в значительном диапазоне: для  $^{137}\text{Cs}$  – от 1,7 до 225 раз,  $^{90}\text{Sr}$  – от 4 до 25 раз.

2. Соотношение форм нахождения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в луговых почвах экосистемы водотока штольни существенно различаются.  $^{137}\text{Cs}$  в почве в основном

находится в прочносвязанном состоянии. В отличие от  $^{137}\text{Cs}$ , основное содержание  $^{90}\text{Sr}$  приходится на долю обменной формы, по-видимому, обуславливающей большую миграционную способность  $^{90}\text{Sr}$ , нежели  $^{137}\text{Cs}$ .

3. В результате проведенного корреляционного анализа удалось выявить наличие лишь тенденции слабого влияния некоторых физико-химических свойств почв на относительное содержание форм нахождения техногенных радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в исследуемой луговой почве.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Стрильчук, Ю. Г. Изучение радионуклидного загрязнения по водотокам из штолен и ручьям горного массива «Дегелен» / Ю. Г. Стрильчук, О. И. Артемьев // Радионуклидное загрязнение территории Семипалатинского полигона : материалы научно-практической конф. по проекту МНТЦ К-053. - Алматы: ИЯФ НЯЦ РК, 1999. - С. 73-80.
2. Субботин, С. Б. Радиоэкологические исследования приустьевых участков штолен испытательной площадки «Дегелен» / С.Б. Субботин, Л.Д. Птицкая, В.Н. Ларин // Радионуклидное загрязнение территории Семипалатинского полигона: материалы научно-практической конф. по проекту МНТЦ К-053. - Алматы : ИЯФ НЯЦ РК, 1999. - С. 65-72.
3. Ларионова, Н.В. Изучение параметров накопления искусственных радионуклидов растениями лугового биогеоценоза / Н.В. Ларионова, С.Н. Лукашенко, А.М. Кабдыракова, Р.Ю. Магашева, А.В. Паницкий, Н.В. Ястребкова, Ж.А. Байгазинов // Вестник НЯЦ РК. - 2008. - выпуск 3. - С. 33 – 38.
4. Отчет о научно-технической деятельности Института радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК, выполненного по НТП 0346 "Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан" за 2005 год / Отчет информационный, руководитель Птицкая Л.Д. – Курчатов. – 2005. – 39 с.
5. ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества.
6. Воробьева, Л. А. Химический анализ почв / Л. А. Воробьева. – М.: МГУ, 1998. – 271 с.
7. ГОСТ 26423-85 – ГОСТ 26428-85. Почвы. Методы определения катионно - анионного состава водной вытяжки.
8. Сборник методических указаний по лабораторным исследованиям почв и растительности Республики Казахстан. - Алматы, 1998. - 226 с.
9. ГОСТ 12536-79. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) состава и микроагрегатного состава.
10. Практикум по агрохимии / под ред. В. Г. Минеева. – М. : МГУ, 2001. – 268 с.
11. Агеец, В. Ю. Система радиоэкологических контролей в агрофере Беларуси / В. Ю. Агеец. - Гомель : РНИУП "Институт радиологии", 2001. - 250 с.
12. Молчанова, И. В. Эколого-геохимические аспекты миграции радионуклидов в почвенно-растительном покрове / И. В. Молчанова, Е. Н. Караваева. - Екатеринбург: УрО РАН, 2001.
13. Дерфель, К. Статистика в аналитической химии / К.Дерфель. – М.: Мир, 1994. – 268 с.

### «ДЕГЕЛЕН» АЛАҢЫНЫҢ № 176 ШТОЛЬНЯСЫ ЭКОЖҮЙЕСІНІҢ ДАЛА ТОПЫРАҒЫНДАҒЫ РАДИОНУКЛИДТЕРДІҢ БОЛУ НЫСАНДАРЫ

Қабдырақова А.М., Ларионова Н.В., Лукашенко С.Н., Магашева Р.Ю.

*ҚР ҰЯО Радиациялық қауіпсіздік және экология институты, Курчатов, Қазақстан*

Бұл жұмыста бұрынғы Семей сынақ полигонындағы «Дегелен» сынақ алаңының № 176 штольнясында жиналған судың экожүйесінің дала топырақтарындағы  $^{137}\text{Cs}$  және  $^{90}\text{Sr}$  техногенді радионуклидтердің болу нысандарын зерттеу нәтижелері келтіріледі. Зерттелетін экожүйенің кеңістіктегі шектеулері мен топырақ түрлері, табиғи-климаттық жағдайлар сияқты басқа да жағдайлардың бірдейлігіне қарамастан, топырақта радионуклидтердің болу нысандарының мөлшерінде біраз ауыспашылық бар екендігі анықталды. Зерттелетін экожүйенің топырағында  $^{137}\text{Cs}$  үшін басым нысан мықты байланысқан болса,  $^{90}\text{Sr}$  үшін – ауыспалы болып табылатындығы көрсетілген. Жүргізілген корреляциялық талдау нәтижесінде зерттелеген топырақтың физика-химиялық қасиеттерінің  $^{137}\text{Cs}$  және  $^{90}\text{Sr}$  радионуклидтердің болу нысандарының мөлшеріне мүмкін боларлық әсері бағаланды.

**INVESTIGATION OF RADIONUCLIDE SPECIES IN MEADOW SOILS  
IN ECOSYSTEM OF THE TUNNEL NO.176 AT THE “DEGELEN” TEST SITE**

**A.M. Kabdyrakova, N.V. Larionova, S.N. Lukashenko, R.Yu. Magasheva**

*Institute of Radiation Safety and Ecology NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

Outcomes of investigation of artificial radionuclides  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  species in meadow soils at the “Degelen” test site of the former Semipalatinsk Tests Site are presented in this paper. It was revealed that there is significant variation for radionuclides species in soil, irrespective of geometric constraint of investigated ecosystem and identity of other conditions such as soil type, natural-climatic conditions. It was shown that prevailing species for  $^{137}\text{Cs}$  is well-fixed and it is exchangeable for  $^{90}\text{Sr}$  in soils on the investigated ecosystem. Potential influence of physical-chemical properties of investigated soils for species of radionuclides  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  was estimated as a result of carried out correlation analysis.

УДК 620.191:621.386.8

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМАТРОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ

Дядов С.И., Зуев В.А., Игнашев В.И., Микиша А.В.

*Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

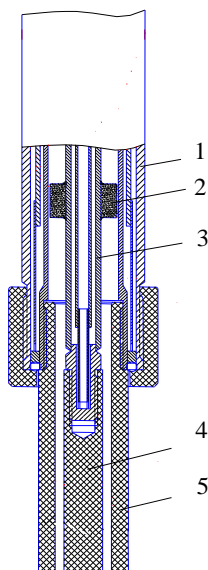
Рассмотрены факторы, влияющие на мощность и длительность работы плазматронного нагревателя, имитирующего остаточное энерговыделение в кориуме. Изменением конструкции графитовых наконечников и подбором газа в межэлектродном пространстве увеличено время работы плазматрона с 10 до 120 мин и повышена его мощность с 12 до 19 кВт.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на экспериментальной установке «Лава-Б» стенда «Ангара» в институте Атомной энергии ведутся работы по изучению взаимодействия кориума с материалом модели днища силового корпуса реактора и методов снижения последствий этого взаимодействия.

Для имитации остаточного энерговыделения в кориуме, находящемся в модели днища корпуса реактора, был разработан и создан комплекс электродугового нагрева кориума. В состав комплекса вошли нагреватель кориума, представляющий собой три электродных узла (плазматрона) расположенных на бетонной подставке и две системы для электропитания их постоянным и переменным током. Конструктивная схема электродного узла приведена на рисунке 1.

Для исключения заполнения расплавом межэлектродного пространства, образования электропроводящих мостов графитовой пылью и создания рабочей среды, обеспечивающей устойчивое горение электрической дуги, в межэлектродное пространство подается инертный газ – аргон.

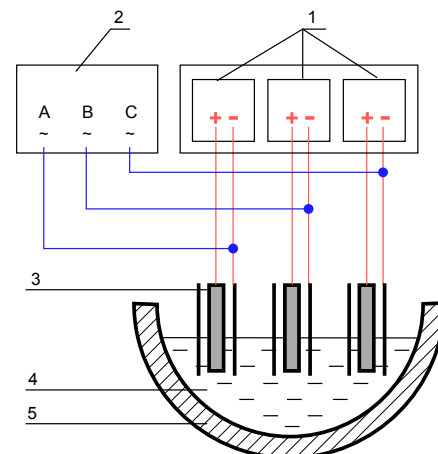


1 – медный внешний электрод; 2 – центровочная втулка (изолятор); 3 – медный внутренний электрод; 4 – графитовый наконечник внутреннего электрода; 5 – графитовый наконечник внешнего электрода.

*Рисунок 1. Схема электродного узла*

Система постоянного тока предназначена для организации дугового разряда между внутренним и внешним электродом, с целью предварительного нагрева самих электродов и передачи энергии в расплав. А система переменного тока предназначена для передачи энергии расплаву путем прямого пропускания тока через расплав между наружными электродами, используя идею электрошлакового процесса. Идея состоит в том, что при прямом пропускании тока мощность выделяется в шлаке, так как шлаки отличаются от металлов более высоким удельным электросопротивлением, составляющим  $\sim 1 \cdot 10^{-3}$  Ом-м. А оценочное значение удельного сопротивления сливаемого расплава (кориума) на уровне температуры  $\geq 1500^\circ\text{C}$  должно составлять  $\sim 1 \cdot 10^{-4}$  Ом-м, которое близко к удельному сопротивлению шлака. Поэтому предполагалось, что основная передача энергии будет осуществляться именно с помощью прямого пропускания тока через расплав, составляющего 4-8 кА.

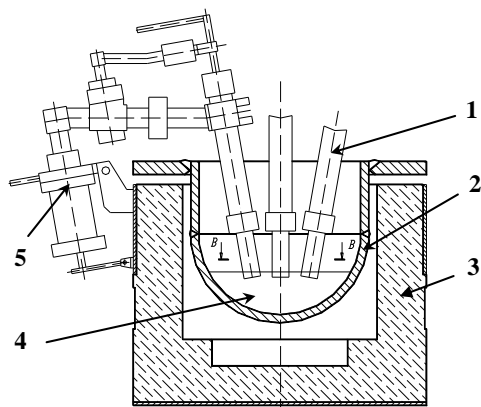
Блок – схема нагревателя показана на рисунке 2.



1 – блок питания постоянным током; 2 – блок питания трехфазным переменным током; 3 – электроды; 4 – расплав; 5 – модель днища корпуса реактора

*Рисунок 2. Блок-схема нагревателя*

На рисунке 3 приведена схема расположения электродных узлов (плазматронов) в модели днища реактора и фотография модели днища с плазматронами.



1 – электрод; 2 – модель днища; 3 – бетонная подставка; 4 – расплав; 5 – электродный узел.

Рисунок 3. Схема установки плазматронов нагревателя в модели днища реактора



По условиям экспериментов с моделью днища корпуса реактора система нагрева расплава должна обеспечивать следующие параметры:

- мощность, подводимая к расплаву, кВт 75-90;
- поддерживаемая температура расплава, °C не менее 2500;
- время непрерывной работы, ч не менее 2.

В процессе экспериментов было установлено, что система с прямым пропусканием тока через расплав не эффективна, поэтому для имитации остаточного энерговыделения в расплаве, была выбрана система электродугового нагрева плазматронного типа, с использованием постоянного тока.

Система постоянного тока в силу своих особенностей имеет некоторые преимущества перед системой прямого пропускания тока. Мощность в плазматроне выделяется в районе горения дуги, т.е. в нижней части электродов, которые заглублены в расплав. Верхняя часть электродов за счет малых токов (~400 А) нагревается меньше и значит, потери тепла с водой охлаждения и излучением будут сравнительно меньше.

Но разработанная конструкция электродных узлов и система электропитания постоянным током плазматронов имели ряд недостатков. Так реализованная мощность на одном плазматроне была равна ~12 кВт. Максимальное время работы плазматронов в расплаве не превышало 10 минут. Основным недостатком плазматронов состоял в том, что они были спроектированы с открытой электрической дугой, т.е. с дугой на которую влияет как среда, так и расплав. Плазматроны гасли и имели нестабильный поджиг дуги после слива расплава в модель днища реактора.

С целью достижения заданных характеристик нагревателя была проведена серия экспериментов, в ходе которой были изучены и определены факторы, влияющие на параметры нагревателя. К ним относятся:

- конструкция графитовых наконечников плазматронов;
- состав газообразной среды в межэлектродном пространстве;

- схема подключения электродов к системе электропитания.

#### ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ НАКОНЕЧНИКОВ НА ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ ПЛАЗМАТРОНА

В результате проведенных экспериментов было установлено, что при работе с модифицированным внешним и штатным внутренним графитовым наконечником мощность плазматрона уменьшается на ~20 %, однако надежность и время работы плазматрона при сливе расплава значительно повышается.

При применении модифицированного внутреннего наконечника мощность плазматрона увеличивается на ~11 %, а время работы плазматрона уменьшается за счёт уменьшения массы внутреннего наконечника. Кроме того, было замечено, что при экспериментах с большой длительностью форма наконечника внутреннего электрода к концу эксперимента становится одинаковой независимо от первоначальной формы. Поэтому в дальнейшем эксперименты проводились со штатным наконечником внутреннего электрода цилиндрической формы.

На рисунке 4 показаны штатные наконечники электродов плазматрона открытого типа, а на рисунке 5 приведена первая модификация наконечников электродов плазматрона закрытого типа.

В общей сложности было выполнено 25 экспериментов серии ТП (Тест с Плазматроном), в которых определялось влияние различных факторов на работу плазматрона, в том числе определялись:

- скорость эрозии графитовых наконечников электродов плазматрона в зависимости:
  - от температуры поверхности наконечников электродов;
  - геометрических размеров наконечников плазматрона;
  - марки материала графитовых наконечников;
- мощность плазматрона в зависимости от межэлектродного расстояния;
- стойкость защитного покрытия при проведении ресурсных испытаний, при его контакте с расплавляемыми материалами.



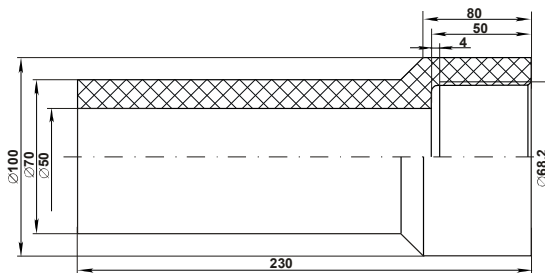
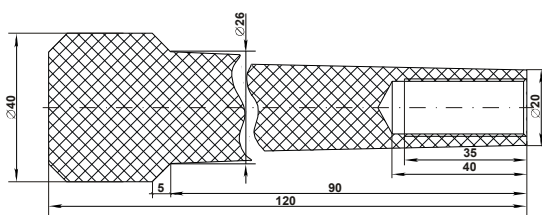


Рисунок 4. Штатные наконечники электродов

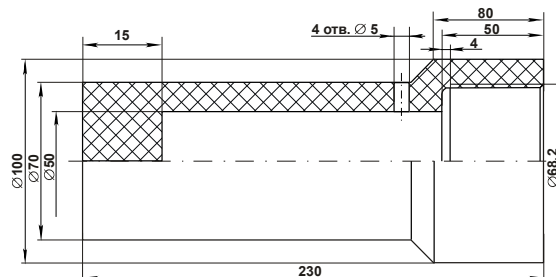
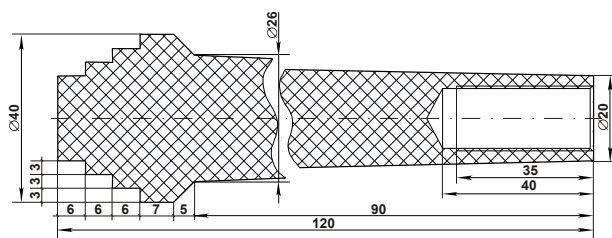


Рисунок 5. Первая модификация доработанных наконечников электродов плазматрона

#### МОЩНОСТЬ ПЛАЗМАТРОНА И ЭРОЗИЯ НАКОНЕЧНИКА ВНУТРЕННЕГО ЭЛЕКТРОДА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Во время проведения экспериментов для повышения температуры наконечников плазматрона, внешний наконечник был обернут четырьмя слоями графитовой теплоизоляции (толщина слоя изоляции составляла ~20 мм). Эксперименты проведены для имитации контакта плазматрона с кориумом. При повышении температуры более 2100°C для среды аргона в межэлектродном пространстве мощность плазматрона уменьшилась на ~30 %, а для среды азота в межэлектродном пространстве на ~15% по сравнению с экспериментами во время которых температура наконечника внешнего электрода не превышала 1800°C. Однако с увеличением температуры наконечников время работы плазматрона сократилось за счет интенсивного разрушения внутреннего наконечника, вследствие чего размеры наконечников поменялись в сторону увеличения их геометрических размеров. Сделано это было с целью увеличения продолжительности эксперимента. Кроме того, с увеличением диаметра наконечника внешнего электрода выросла площадь теплообмена между наконечником и расплавом. Одна из последних модификаций наконечников электродов показана на рисунке 6.

Как видно из рисунка 6 помимо увеличения геометрических размеров на наконечнике внутреннего электрода был выполнен поясик высотой 5 мм для облегчения запуска плазматрона. С целью экономии наконечник внешнего электрода сделан из двух частей, так как верхняя часть наконечника практически не изменяется в процессе экспериментов.

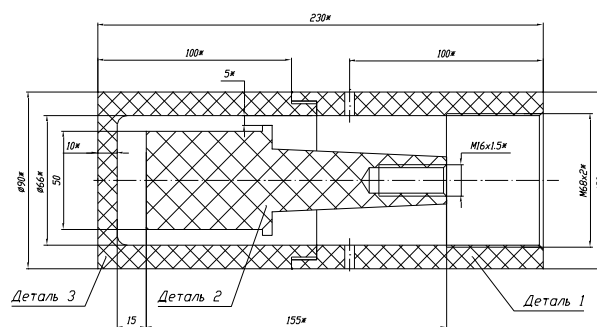


Рисунок 6. Наконечники электродов плазматрона

В диапазоне значений температуры графитового наконечника внешнего электрода плазматрона от 1800 до 2500°C и мощности плазматрона от 13,7 до 19,4 кВт, получены следующие характеристики:

- скорость разрушения наконечника внутреннего электрода из графита АРВ, г/мин
  - с внешним диаметром наконечника 40 мм – 0,94 - 2,99;
  - с внешним диаметром наконечника 50 мм – 0,64 - 2,51;
- скорость разрушения наконечника внутреннего электрода из графита R 4340, г/мин
  - с внешним диаметром наконечника 50 мм – 1,7.

Приведенные данные показывают, что с увеличением размеров (массы) электродов скорость их эрозии снижается (увеличивается время непрерывной работы плазматрона). Скорость разрушения графита марки R 4340 меньше, чем скорость разрушения графита марки АРВ.

**Влияние расстояния между торцом наконечника внутреннего электрода и дном наконечника внешнего электрода на мощность плазматрона**

Исследования показали, что при прочих равных условиях мощность плазматрона не зависит от расстояния между наконечниками электродов при расстоянии меньше 15 мм и больше ~35 мм. В интервале расстояний от 15 мм и до 35 мм между наконечниками плазматрона мощность растет практически линейно. Экспериментальные данные (на графике показаны цветными точками) и прямые, экстраполирующие эти данные, показаны на рисунке 7.

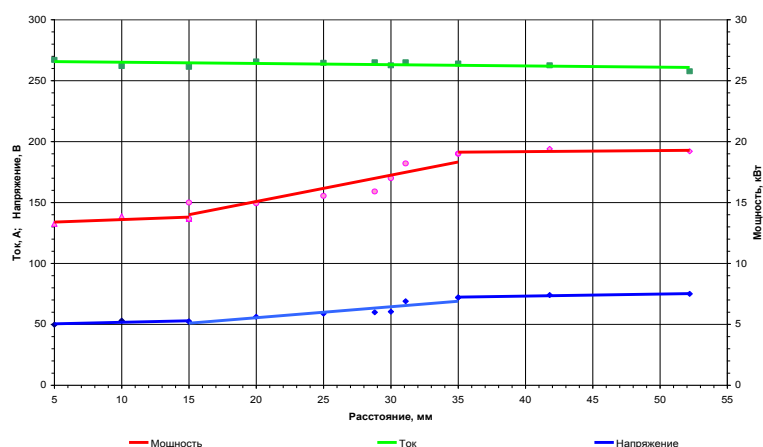


Рисунок 7. Данные по току, напряжению и мощности плазматрона в зависимости от расстояния между наконечниками электродов

**Устойчивость защитного покрытия из карбидизированного циркония графитового наконечника внешнего электрода плазматрона к воздействию окисной среды при высоких температурах**

Проведенные эксперименты показали, что защитный слой из карбидизированного циркония не обладает достаточной механической прочностью, так как наблюдается его отслаивание с поверхности графитового наконечника (на рисунке 8 показано красными стрелками).

Эрозия торцевой поверхности наконечника незначительна, а боковой поверхности практически отсутствует. Это свидетельствует о том, что отслоение покрытия произошло, наиболее вероятно, на стадии остывания экспериментальной сборки. Следовательно, применённое покрытие защищает графитовый наконечник от влияния окисидной среды.

Внешний вид нижнего торца наконечника внешнего электрода, после удаления с него части расплава циркония с растворенным в нем диоксидом урана, приведен на рисунке 8.

При работе плазматрона электрическая дуга горит между торцом наконечника внутреннего электрода и дном наконечника внешнего электрода, если расстояние между ними составляет от 5 мм до 25 мм. При увеличении расстояния между торцевыми поверхностями наконечников внутреннего и внешнего электродов более 25 мм происходит смещение электрической дуги на боковую поверхность наконечника внешнего электрода, и её горение происходит между торцом наконечника внутреннего электрода и боковой поверхностью наконечника внешнего электрода, при этом длина дуги составляет ~25 мм.



Рисунок 8. Внешний вид нижнего торца графитового наконечника внешнего электрода после удаления части кору́мы (стрелками показано отслоение карбидизированного покрытия)

**Влияние состава среды в межэлектродном пространстве на параметры плазматрона**

В процессе проведения одного из экспериментов аргон в межэлектродном пространстве был заменён на азот. При этом мощность, выделяющаяся в плазматроне, увеличилась на ~44 % (за счет увеличения напряжения пробоя между электродами). Изменение параметров работы плазматрона при замене среды в межэлектродном пространстве с аргона на азот показано на рисунке 9.

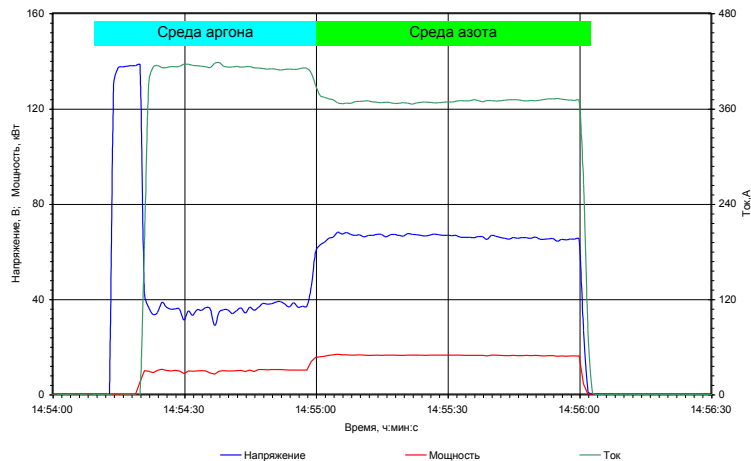


Рисунок 9. Изменение параметров работы плазматрона

Во время проведения экспериментов по вводу в эксплуатацию нового электрооборудования (с целью увеличения суммарной мощности подводимой в расплав) было выявлено, что при работе плазматрона (рабочий ток 230 А) с подачей в межэлектродное пространство азота происходит самопроизвольное гашение дуги при повышении давления в устройстве приема расплава. Для поддержания мощности плазматрона и исключения гашения дуги, было принято решение о проведении экспериментов на смеси газов аргона и азота, подаваемых в межэлектродное пространство. Эксперименты показали, что замена азота в межэлектродном пространстве на смесь газов приводит к снижению мощности на  $\sim 1$  кВт, но характер горения дуги становится более устойчивым. Процентное соотношение аргона и азота составило 30% и 70% соответственно.

#### ВЛИЯНИЕ ПОЛЯРНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ НА ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМАТРОНА

При проведении экспериментов со сменой полярности при одинаковых прочих условиях, было выявлено, что при прямой полярности, внешний электрод анод «+» внутренний катод «-», дуга загорается, но вращения дуги нет, что приводит к быстрому выходу из строя графитового наконечника внешнего электрода. А при обратной полярности происходит вращение дуги, что ведёт к меньшему разрушению наконечника внешнего электрода, а наконечник внутреннего электрода является расходуемым. Так же при обратной полярности прогрев наконечников происходит лучше, следовательно, и теплоотдача от них больше.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проведении экспериментов с плазматронами, которые имитируют энерговыделение в корииуме, получены следующие результаты:

1. Показано, что максимальная мощность одного плазматрона может достигать  $\sim 19,4$  кВт, поэтому для получения планируемого максимального энерговыделения в корииуме  $\sim 90$  кВт необходимо использовать как минимум 5 плазматронов. Системы установки «Лава-Б» подготовлены к использованию в качестве нагревателей пяти плазматронов.

2. Повышение мощности плазматрона можно достичь, используя в качестве газа, подаваемого в межэлектродное пространство, азот или смесь азота и аргона вместо аргона. Экспериментально достигнуто увеличение мощности плазматрона на  $\sim 44$  % при замене среды в межэлектродном пространстве с аргона на азот (при прочих равных условиях).

3. С увеличением внешнего диаметра графитового наконечника внешнего электрода, увеличивается площадь теплообмена между плазматроном и корииумом, что ведёт к увеличению мощности передаваемой от плазматрона в корииум.

4. Экспериментально получено значение скорости эрозии графитовых наконечников. Максимальная величина скорости эрозии не превышает 3 г/мин.

5. Увеличение длины графитового наконечника внутреннего электрода плазматрона позволило экспериментально достичь продолжительности функционирования плазматрона более 2 часов – планируемое время работы плазматрона.

6. Для устойчивой работы плазматрона применена такая полярность, при которой внешний электрод является катодом «-», а внутренний электрод – анодом «+». В этом случае электрическая дуга вращается в межэлектродном пространстве. Воздействие электрической дуги на внутреннюю поверхность графитового наконечника внешнего электрода плазматрона минимально.

7. Изучено влияние расстояния между наконечниками плазматрона на его мощность. Наиболее оптимальным является начальное расстояние между дном наконечника внешнего электрода и торцом наконечника внутреннего электрода равное  $\sim 22$  мм.

8. Защитное покрытие из карбида циркония уменьшает эрозию наконечников электрода в оксидной среде.

Имитация остаточного энерговыделения с помощью адаптированного к заданным условиям работы электрического нагревателя, позволит наиболее точно понять процесс взаимодействия расплава активной зоны с конструкционными материалами реактора и дальнейшую выработку мер направленных на безопасную эксплуатацию ядерных реакторов.

**ПЛАЗМАТРОНДЫ ЖЫЛЫТҚЫШ СИПАТТАМАЛАРЫНЫҢ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУЛЕРІ**

**Дядов С.И., Зувев В.А., Игнашев В.И., Микиша А.В.**

*ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан*

Кориумда қалдық энерго бөлуді еліктейтін, плазматронды жылытқыштың жұмыс ұзақтығы және қуатына әсер ететін факторлар қарастырылды. Электрод арасындағы кеңістікте газды талдау және графитты ұштарының конструкцияларын өзгеруімен, плазматронның жұмыс уақыты 10 мин тан 120мин дейін артты және оның қуаты 12 ден 19 кВт дейін көтерілді.

**EXPERIMENTAL RESEARCHES OF PLASMATRON HEATER CHARACTERISTICS**

**S.I. Dyadov, V.A. Zuev, V.I. Ignashev, A.V. Mikisha**

*Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

We consider the factors affecting the power and duration of the plasmatron heater simulating residual energy release in corium. Time of plasmatron operating from 10 to 120 min and its power from 12 to 19 kW is increased by changes in design of graphite tips and selection of gas in the interelectrode space.

УДК 620.191:621.386.8

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЗАЩИТНОГО МАТЕРИАЛА ПЕРВОЙ СТЕНКИ ИТЭР НА УСТАНОВКЕ ГСЭП-3

Бакланов В.В., Дерявко И.И., Кукушкин И.М., Тарасенко Е.В.

*Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

Представлены результаты второго этапа исследований поведения бериллия в условиях импульсного облучения сильноточным пучком электронов. На этом этапе исследована динамика нарастания поврежденности материала с увеличением количества импульсов электронного облучения.

### ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно (например, [1]), что материал защитного слоя первой стенки ИТЭР будет подвергаться мощному воздействию теплового и гамма-излучения, а также корпускулярных потоков из плазмы (нейтроны высокой энергии, молекулы, атомы, ионы, электроны). Поэтому исследование характеристик стойкости такого защитного материала к воздействию указанных нагрузок является весьма актуальной задачей.

В 2006-2007 годах в ИАЭ НЯЦ РК выполнялись исследования, общей целью которых являлось изучение особенностей повреждения бериллия – кандидата материала защитного слоя первой стенки реактора ИТЭР – под воздействием импульсного электронного облучения, имитирующего условия срыва плазмы на первую стенку. Облучение бериллия короткими (около 3 мкс) импульсами сильноточного (до 0,3 кА/см<sup>2</sup>) пучка высокоэнергетических (около 0,5 МэВ) электронов осуществлялось в ускорителе ГСЭП-3, позволявшем создавать на облучаемой плоской поверхности площадью до 100 см<sup>2</sup> удельные тепловые потоки до 50 ГВт/м<sup>2</sup>. Работа выполнялась в два этапа: на первом этапе в 2006 году проводилось сопоставление стойкости поверхностей бестекстурного и текстурированного экструзией бериллия к электронному воздействию, на втором этапе в 2007 году исследовалась динамика развития поврежденности поверхности бериллия с увеличением количества электронных импульсов.

Результаты исследований на первом этапе показали [2-4], что при облучении Ве-образцов со средней плотностью энергии ~14 Дж/см<sup>2</sup> имеют место заметные различия в степени и характере повреждаемости поверхностей различного типа. Так, у поверхностей бестекстурного бериллия фиксировалось сильное оплавление и распыление величиной около 10 мг/см<sup>2</sup>; у поверхностей, параллельных оси текстуры, – образование глубоких (до ~1,5 мм) макротрещин и распыление на уровне 6 мг/см<sup>2</sup>; у поверхностей, перпендикулярных оси текстуры, – образование лишь отдельных неглубоких трещин при распылении на уровне 4 мг/см<sup>2</sup>. То есть наиболее стойкой к электронному воздействию оказалась поверхность текстурированного образца, перпендикулярная оси текстуры. В связи с этим была высказана реко-

мендация об использовании в качестве материала защитного слоя первой стенки ИТЭР вместо бестекстурного бериллия текстурированного, у которого обращенная к плазме поверхность перпендикулярна оси текстуры.

Установленное различие в стойкости различных типов поверхностей к электронному воздействию было получено в следующих условиях: расстояние от поверхности образца до взрывоэмиссионного катода составляло 35 мм; ускоряющее напряжение – 520 кВ; энергия, накапливаемая генератором импульсов, – около 1,4 кДж; длительность импульса – 3 мкс; количество импульсов – 6; интервал между импульсами – 180 с. Следует обратить внимание на то, что каждый образец попадал на обследование только после завершения шестикратного облучения. В таком случае фиксировался только общий уровень деградации облучаемой поверхности, накопленной за шесть импульсов, и, следовательно, данные о динамике развития деградации поверхности с увеличением количества импульсов электронного облучения полностью отсутствовали.

В связи с этим основной задачей второго этапа работ являлось выяснение того, в какой виде протекает процесс повреждения бериллия при электронном облучении: в виде постепенного нарастания деградации материала от импульса к импульсу или же в виде мощного повреждения в первом импульсе с последующим слабым его увеличением в последующих импульсах. Для решения этой задачи была проведена подготовка установки ГСЭП-3 и образцов к испытаниям, выполнены их электрофизические испытания (с непрерывным отслеживанием за морфологическими изменениями поверхности и степенью ее распыления) и исследован характер структурных изменений в материале образцов [5].

### ПОДГОТОВКА УСТАНОВКИ И ОБРАЗЦОВ

В установке сильноточного электронного пучка ГСЭП-3 (рисунок 1) ускорение электронов происходит в вакуумном диоде, на взрывоэмиссионный катод (ВЭК) которого подается ускоряющее напряжение ГИНа; расстояние между ВЭКом и анодом (образцом) варьируется в пределах от 20 до 50 мм. Управление зарядкой высоковольтных конденсаторов ГИНа и пуском ускорителя осуществляется дистанционно с удаленного пульта управления.



Подготовка установки к испытаниям состояла в том, чтобы путем усовершенствования конструкции катодного и анодного узлов, во-первых, обеспечить приемлемую равномерность электронного облучения поверхности образца, а во-вторых, повысить надежность определения степени распыления облучаемой поверхности.



Рисунок 1. Внешний вид установки ГСЭП-3 (на переднем плане – вакуумный диод, на заднем – генератор импульсного напряжения (ГИН) конденсаторного типа)

Наличие неравномерности облучения (обусловленной как неравномерностью распределения плотности потока электронов, характерной для сильноточных ускорителей с большой площадью сечения пучка, так и особенностями конструкции взрывоэмиссионного катода) может привести к очень сильному искажению результатов испытаний. Так, при использовании в работах первого этапа ВЭКа с 19 цилиндрическими фторопластовыми элементами, обмотанными графитовой тканью (рисунок 2а), у всех текстурированных образцов визуально обнаруживалась явно неодинаковая деградация различных участков облученной поверхности. Поэтому ВЭК в варианте с 19 элементами был заменен на ВЭК в варианте с 93 заостренными графитовыми элементами (рисунок 2б).

Надежность определения степени распыления облучаемой поверхности образца, как известно, зависит от надежности определения потери его массы. В испытаниях на первом этапе снижение надежности определения этой важной характеристики наблюдалось в отдельных случаях локального приваривания кромки облучаемой поверхности образца к мишени анодного узла установки, а также приваривания локальных участков тыльной поверхности образца к стальным элементам токоподвода в анодном

узле. В связи с этим вместо анодного узла с общим для всех трех типов образцов установочным отверстием в плоской мишени был разработан усовершенствованный анодный узел, содержащий три съемные дисковые стальные мишени для каждого из трех типов используемых образцов, то есть призматических образцов с облучаемой поверхностью размером 20×20 мм, призматических образцов с облучаемой поверхностью размером 15×20 мм и цилиндрических образцов с облучаемой поверхностью диаметром 14 мм. Представление о конструкции мишени такого анодного узла можно получить из рисунка 3, на котором показаны тыльная сторона мишени для облучения образца с рабочей поверхностью 20×20 мм, а также фронтальная сторона мишени для облучения цилиндрических образцов.

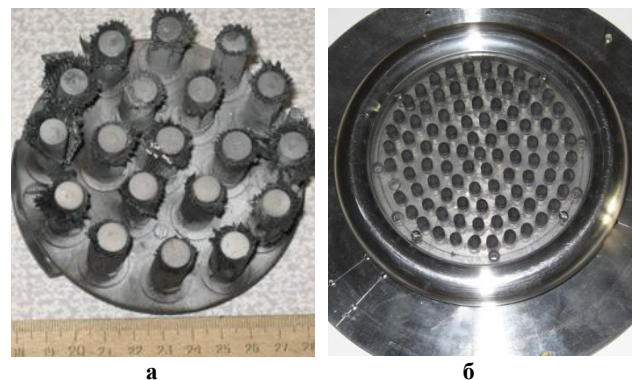


Рисунок 2. Катоды с 19 (а) и 93 (б) элементами



а – тыльная сторона мишени анодного узла для образца с рабочей поверхностью размером 20×20 мм; б – фронтальная сторона мишени анодного узла для образца с рабочей поверхностью диаметром 14 мм

Рисунок 3. Детали усовершенствованного анодного узла

Для устранения локального приваривания кромки рабочей поверхности образца к мишени в установочных отверстиях всех мишеней предусмотрены зазоры размером не менее 1 мм по всему периметру образца (зазор надежно удерживается в процессе испытаний за счет прочного закрепления призматического образца в плоских стальных обкладках двумя болтами (рисунок 3а) и такого же закрепления цилиндрического образца в стальных обкладках уголкового типа (цилиндр зафиксирован по четырем образующим). Те и другие обкладки создают, кроме того, хороший электрический контакт с образцом.



Что касается подготовки образцов к испытаниям, то эти операции состояли в вырезке партии текстурированных и бестекстурных образцов, маркировке каждого образца, изготовлении металлографических шлифов на поверхностях, подлежащих электронному облучению, и материаловедческой аттестации каждого образца в исходном состоянии (макрофото съемка и измерение массы и высоты образца).

Формы и размеры подготовленных Ве-образцов: прямые призмы размером  $15 \times 20 \times 20$  мм у текстурированных образцов и цилиндры размером  $\varnothing 14 \times 12$  мм у бестекстурных. У призматических образцов четыре поверхности с размерами  $15 \times 20$  мм были параллельны оси текстуры, а две поверхности с размерами  $20 \times 20$  мм – перпендикулярны этой оси.

#### ПРОБНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ

Режим облучения бериллиевых образцов в ускорителе ГСЭП-3 на втором этапе работ был выбран близким к режиму их испытаний на первом этапе, только количество импульсов перестало быть равным шести, а расстояние от поверхности образца до катода (межэлектродный зазор) в начале пробной серии испытаний, в целях смягчения условий облучения, было выбрано равным не 35, а 42 мм.

Первый из испытанных образцов (один из призматических образцов с ориентацией рабочей поверхности перпендикулярно оси текстуры) был последовательно облучен 1, 2, 4, 10 и 22 электронными импульсами. После каждого из этих пяти циклов импульсов был проведен визуальный осмотр образца, измерение его массы и высоты, а также фотографирование облученной поверхности. Из результатов определения распыления рабочей поверхности и визуальной оценки ее морфологического состояния следовало, что процесс повреждения этого образца электронами в указанных условиях протекает в форме постепенного (хотя и очень слабого) нарастания деградации материала от импульса к импульсу.

В дальнейших испытаниях одного из призматических образцов с ориентацией рабочей поверхности параллельно оси текстуры в целях усиления влияния электронного облучения были ужесточены условия облучения путем уменьшения межэлектродного зазора, причем вначале зазор был уменьшен только до 38 мм. После облучения образца 1 и 3 электронными импульсами было выяснено, что и степень распыления образца, и состояния его рабочей поверхности свидетельствуют о практически полном отсутствии ее повреждения. И только в случае облучения этого образца 1, 4, 6 и 8 импульсами при уменьшенном до 35 мм зазоре удалось четко зафиксировать постепенное (но все еще слабое) повышение поврежденности поверхности образца (рисунок 4) и потери его массы (рисунок 5) с увеличением количества импульсов электронного пучка. Из полученного следовало, что ВЭЖ многоостриной конструкции обеспечивает очень высокую равномерность облучения поверхности бериллиевого об-

разца, но не способен обеспечить облучение этой поверхности с той же средней плотностью энергии (порядка  $14 \text{ Дж/см}^2$ ), которую создавал прежний ВЭЖ с 19 катодными элементами.

Этим легко объясняется и отсутствие заметной деградации облучаемых новым катодом поверхностей бериллиевых образцов, и отсутствие значительного распыления материала их поверхностей. В частности, степень распыления поверхности образца (рисунке 5) после шести импульсов облучения достигла только  $1 \text{ мг/см}^2$ , что примерно в 6 раз меньше, чем степень распыления аналогичных поверхностей текстурированных Ве-образцов, облучавшихся на первом этапе работ ВЭЖом с 19 катодными элементами.

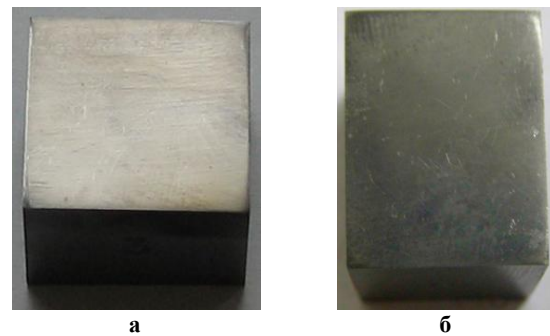


Рисунок 4. Поверхность образца после 4 (а) и 8 (б) импульсов облучения (межэлектродный зазор 35 мм)



Рисунок 5. Изменение массы образца с увеличением количества импульсов электронного облучения (меж-электродный зазор 35 мм)

В связи с этим было проведено экспериментальное определение средней плотности энергии облучения бериллия многоостриным катодом, которое показало, что ее величина действительно заметно ниже  $14 \text{ Дж/см}^2$ . На рисунке 6 представлена полученная из данных информационно-измерительной системы установки ГСЭП-3 диаграмма полной электрической мощности, вкладываемой в анодный узел установки при выполнении единичного импульса электронного облучения.

Расчитанное путем интегрирования мощности количество энергии, вкладываемое в анодный узел, оказалось равным 810 Дж, что при площади сечения пучка падающих на анодный узел электронов размером примерно  $200 \text{ см}^2$  создает среднюю плотность энергии облучения бериллиевого образца около  $4 \text{ Дж/см}^2$ . Отсюда следовало, что для выполнения

испытаний Ве-образцов в условиях, повторяющих условия испытаний на первом этапе работ, необходимо было повысить плотность энергии облучения образцов в три с половиной раза.

Попытка повышения плотности энергии облучения образцов путем увеличения ускоряющего напряжения и дальнейшего уменьшения межэлектродного зазора не принесла желаемого результата: и увеличением напряжения с 520 до 600 кВ, и уменьшением зазора с 35 до 17 мм нельзя было существенным образом повысить плотность энергии облучения. Поэтому было решено заменить ВЭК многоострый конструкции новым ВЭКом.

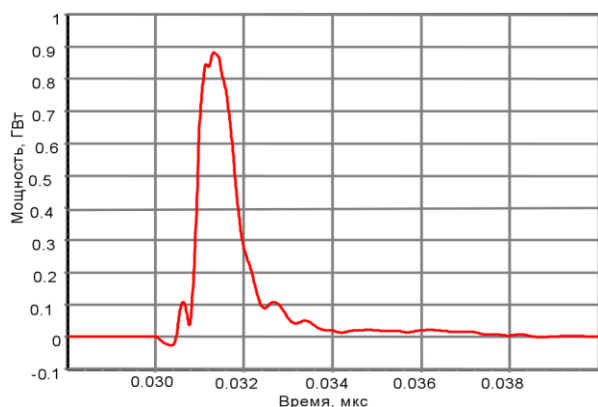


Рисунок 6. Полная мощность, вкладываемая в анодный узел при использовании многоострого катода (напряжение 520 кВ, межэлектродный зазор 35 мм)

#### МОДЕРНИЗАЦИЯ КАТОДНОГО УЗЛА

Поиски необходимой конструкции ВЭКа привели к очень простому решению: был изготовлен катод в виде графитовой трубки с внешним диаметром 20 мм, рабочий торец которой содержит 16 мелких насечек в форме насечек монтажного шлямбура. Трубчатая форма катода обеспечивала высокую концентрацию электронов в пучке (особенно вблизи рабочего торца катода), но никак не гарантировала равномерность облучения анодного узла. В связи с этим в дополнение к трубчатому катоду была использована фторопластовая концентрирующая пластина толщиной 4 мм (рисунок 7), накладываемая на поверхность анодного узла; эта пластина с отверсти-

ем в центре экранировала почти всю поверхность анодного узла, оставляя открытой поверхность испытываемого образца.

Наличие пластины способствовало значительной концентрации (сжатию) электронного пучка, что в свою очередь и создавало существенное повышение равномерности облучения поверхности образца. Пробное облучение образцов с использованием трубчатого катода и концентрирующей пластины с отверстием минимального (25 мм) диаметра показало, что в указанных условиях достигается слишком высокая концентрация пучка электронов. Действительно, на поверхностях всех трех типов образцов (одного бестекстурного и двух текстурированных) уже после трех импульсов обнаруживались (рисунок 8) следы очень сильного оплавления, а степень распыления этих поверхностей оказалась необычно высокой: ~25, ~16 и ~12 мг/см<sup>2</sup> соответственно для бестекстурного образца, образца с осью текстуры вдоль облучаемой поверхности и образца с осью текстуры поперек такой поверхности (следует напомнить, что при использовании на первом этапе работ ВЭКа с 19 катодными элементами после 6 импульсов облучения степень распыления таких же образцов составляла соответственно ~10, ~6 и ~4 мг/см<sup>2</sup>).

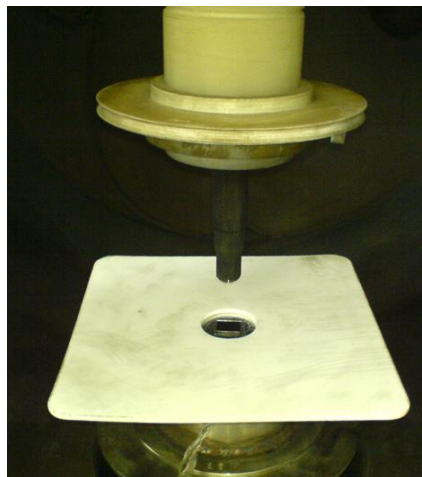


Рисунок 7. Трубчатый катод и концентрирующая пластина в вакуумном диоде установки ГСЭП-3

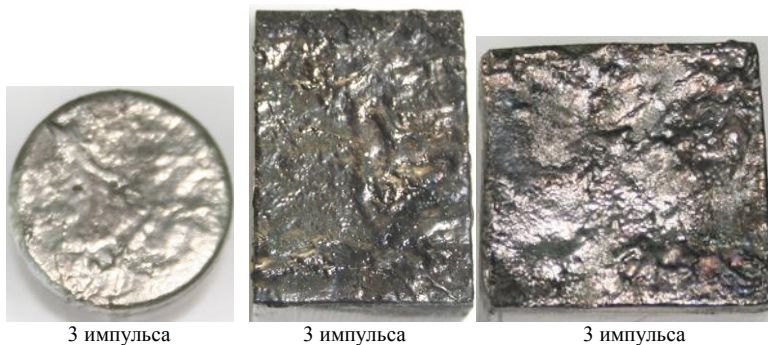


Рисунок 8. Облученные Ве-образцы (трубчатый катод, напряжение 520 кВ, межэлектродный зазор 35 мм, диаметр отверстия в концентрирующей пластине 25 мм)

Для снижения чрезмерно высокой концентрации пучка электронов необходимо было увеличить диаметр отверстия в экранирующей пластине. Было выяснено, что дискретное увеличение диаметра отверстия от исходных 25 до 65 мм каждый раз весьма эффективно уменьшало концентрацию пучка электронов (правда, одновременно с этим так же эффективно снижалась и равномерность облучения поверхности образца).

При выполнении испытаний с ускоряющим напряжением 520 кВ, межэлектродным зазором 35 мм и пластиной, имеющей 65-миллиметровое отверстие, после шести импульсов облучения образцов были достигнуты результаты, практически полностью совпадающие с результатами, полученными ранее при использовании ВЭКа с 19 катодными элементами. То есть у бестекстурного цилиндрического образца наблюдалось оплавление поверхности а у текстурированных призматических образцов наблюдалась явная неравномерность повреждения поверхностей; при этом на поверхности, ориентированной вдоль оси текстуры, присутствовали глубокие макротрещины, а на поверхности, ориентированной поперек оси текстуры, трещины почти отсутствовали, а глубина их была незначительной.

#### ОСНОВНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ

Полученные в пробной серии испытаний результаты позволили выбрать конкретные условия проведения основных испытаний бериллиевых образцов: была решено использовать пластину с компромиссным размером диаметра отверстия, равным 50 мм. Выбранное уменьшение диаметра обеспечило повышение равномерности облучения до приемлемого уровня, а возросшая при этом концентрация пучка электронов была полностью скомпенсирована путем увеличения межэлектродного зазора с 35 до 48 мм и уменьшения ускоряющего напряжения с 520 до 440 кВ (в качестве примера результатов облучения в этих условиях на рисунке 9 приведены снимки типичного вида поврежденных поверхностей).

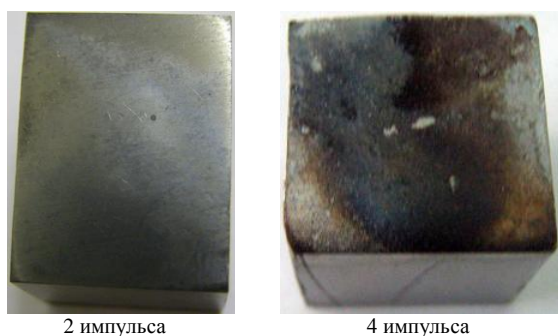


Рисунок 9. Облученные бериллиевые образцы (трубчатый катод, напряжение 440 кВ, межэлектродный зазор 48 мм, диаметр отверстия в концентрирующей пластине 50 мм)

Важно отметить то, что измеренная плотность энергии облучения образцов в выбранных условиях испытаний с использованием трубчатого катода и концентрирующей пластины полностью совпала с плотностью энергии облучения, которую создавал прежний ВЭК с 19 катодными элементами. Измерения плотности энергии были выполнены на основании информации, полученной из данных информационно-измерительной системы установки ГСЭП-3 для полной электрической мощности, вкладываемой в анодный узел в единичном импульсе электронного облучения.

Интегрированием этой мощности, было найдено, что величина вкладываемой в анодный узел энергии равна 540 Дж. Площадь пучка электронов, падающих на анодный узел, составляла  $\sim 38 \text{ см}^2$ ; эта величина была найдена измерением светлого пятна повреждения на поверхности концентрирующей пластины (форма и размер пятна повреждения на пластине – круг с диаметром примерно 7 см). Из полученного следовало, что средняя плотность энергии импульсного ( $\sim 3 \text{ мкс}$ ) облучения образцов в выбранных условиях испытаний составляет около  $14 \text{ Дж/см}^2$ .

Необходимо также отметить и то, что результаты измерений распыления материала поверхностей образцов оказались в хорошем соответствии с результатами, полученными в экспериментах на первом этапе работ: минимальные распыления наблюдались для поверхностей призматических образцов, перпендикулярных оси текстуры, а максимальные – для поверхностей бестекстурных цилиндрических (при этом уровни распыления образцов, облученных шестью электронными импульсами, близки к известным уже величинам 4, 6 и  $10 \text{ мг/см}^2$ ).

Полученные результаты по визуальной оценке состояния облученных бериллиевых поверхностей и по измерению распыления этих поверхностей однозначно указали на то, что процесс повреждения каждого из трех типов поверхностей протекает в форме постепенного нарастания деградации материала от импульса к импульсу. Эти результаты находятся в хорошем соответствии с результатами пробной серии испытаний образцов с применением многоострийного катода.

С использованием выбранного режима электронного облучения была продолжена серия основных испытаний по изучению динамики развития поврежденности бериллия при импульсном электронном облучении. Мерой деградации Ве-поверхностей продолжали оставаться визуально оцениваемое изменение внешнего вида поверхности и количественно измеряемая степень распыления ее материала. Уровни деградации поверхностей всех трех типов образцов в этих испытаниях определялись после 2, 4, 6 и 8 импульсов электронного облучения, т.е. для каждого из трех типов образцов были облучены как минимум четыре поверхности.



По завершении испытаний было установлено следующее. Результаты визуальной оценки изменения внешнего вида поверхностей облученных образцов и результаты измерений степени распыления этих поверхностей в очередной раз подтвердили факт постепенного нарастания деградации поверхности с ростом количества импульсов облучения. В связи с последним на рисунке 10 окончательные результаты измерений степени распыления бериллиевых поверхностей трех типов с увеличением количества импульсов облучения представлены как усреднение данных, полученных во всей серии основных испытаний для девятнадцати облученных бериллиевых поверхностей.

Следует отметить, что данные по распылению бериллиевых поверхностей (рисунок 10) содержат в себе основную информацию о стойкости бериллия в условиях облучения сильноточным пучком электронов, поскольку они отражают и характер, и степень деградации поверхности бериллия с увеличением количества импульсов облучения. Кроме того, эти данные представляют собой достаточно убедительное подтверждение сделанного еще в работах первом этапе электротермических испытаний в 2006 году важного вывода о том, что наиболее стойкой к электронному облучению бериллиевой поверхностью является поверхность, перпендикулярная оси текстуры в образце (а наименее стойкой – поверхность бестекстурного образца).

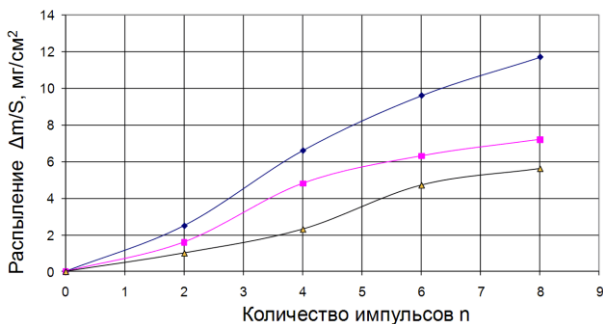


Рисунок 10. Распыление бестекстурных поверхностей (синяя кривая), поверхностей, параллельных оси текстуры (красная кривая), и поверхностей, перпендикулярных оси текстуры (желтая кривая), с увеличением количества импульсов облучения

### СОСТОЯНИЕ ОБЛУЧЕННЫХ ОБРАЗЦОВ

Очевидно, что изучение динамики развития поврежденности бериллиевой поверхности с увеличением количества импульсов электронного облучения будет выполнено более надежно, если результаты измерений распыления материала поверхности и результаты визуальной оценки ее морфологических изменений будут дополнены результатами рентгенографического изучения структурных изменений, возникающих в материале приповерхностного слоя облученного образца. Поэтому для тех облученных бериллиевых образцов, на рентгенограммах которых при-

существовала дифракционная линия 104, т.е. для бестекстурных образцов и образцов с рабочими поверхностями, параллельными оси текстуры, было решено провести измерения таких рентгеновских характеристик материала, как интегральная ширина дифракционной линии  $V_{104}$ , межплоскостное расстояние  $d_{104}$  (соответствующее угловому положению линии  $\vartheta_{104}$ ) и отношение интегральной интенсивности линии к интегральной интенсивности фона  $I_{104}/I_{\text{ф}}$ .

При подготовке к таким исследованиям предварительно были проведены выбор и отработка экспрессной методики рентгенографического изучения материала приповерхностного слоя образца. Рассматривались три методики (послойный анализ срезаемых с поверхности четырех тонких пластин [3], анализ с использованием наклонных съемок [6, 7], анализ с использованием экранирования образца [8, 9]), к которым предъявлялось одно общее требование: возможность исследования материала верхнего тонкого (толщиной около 0,5 мм) слоя облученной поверхности образца. Это требование объяснялось тем, что из результатов работ на первом этапе уже было известно, что именно в приповерхностном слое такой толщины наблюдаются максимальные повреждения структуры бериллия (максимальные изменения положения и формы дифракционной линии 104).

Первая методика не является экспрессной, но она становится таковой, если проводить срезание с поверхности образца не четырех, а только одной пластины, причем необходимой (~0,5 мм) толщины. Экспрессность второй и третьей методик не вызывает сомнений, т.к. в них операции резки образцов вообще отсутствуют. В связи с этим рассмотрим в первую очередь возможности использования второй и третьей методик.

В обеих этих методиках необходимо уменьшить глубину рентгенографирования  $z$  от максимальной  $z_{\text{max}}$  до необходимой  $z_0$ . В частности, во второй методике для этого используется дифрактометрическая съемка образца после его наклона из фокусированного положения (когда угол скольжения  $\alpha$  равен брегговскому углу  $\theta$ ) на выбранный угол  $\beta$  (когда угол скольжения  $\alpha$  становится равным сумме углов  $\theta$  и  $\beta$ ), а в третьей – дифрактометрическая съемка образца в фокусированном положении, но с экранирования этого образца пластиной выбранной толщины  $h_{\text{экр}}$ , изготовленной из материала с заведомо известным линейным коэффициентом поглощения  $\mu_{\text{экр}}$  используемого рентгеновского излучения.

В обеих методиках глубину рентгенографирования можно, вообще говоря, изменять от  $z_{\text{max}}$  до нуля, но, как удалось установить в процессе отработки этих методик, уменьшение ее даже до необходимой глубины  $z_0$ , равной 0,5 мм, встречает значительные трудности, которые связаны в основном с большой глубиной  $z_{\text{max}}$  у бериллиевых образцов при их рентгено съемке в медном излучении. Действительно [10], из-за очень малого линейного коэффициента

поглощения ( $\mu^{\text{Cu}}$  бериллия равен  $2,13 \text{ см}^{-1}$ ) при дифрактометрической съемке с фокусировкой по Бреггу-Брентано глубина  $z_{\text{max}}$ , рассчитанная по формуле  $z_{\text{max}} = A \sin \theta / 2\mu$ , где  $A$  – натуральный логарифм отношения интенсивностей падающего ( $I_0$ ) и дифрагированного ( $I$ ) лучей, составляет для линии 104 примерно 6,6 мм (если коэффициент  $A$  выбрать равным 3,0 в предположении, что в образце поглощается 95 % исходной интенсивности  $I_0$ ). Поэтому во второй методике для уменьшения этой глубины до 0,5 мм, т.е. в 13 раз, необходимо, как следует из расчетов по формуле [11]

$$z_0 = (A/\mu) [\sin(\theta+\beta) \cdot \sin(\theta - \beta)] / [\sin(\theta+\beta) + \sin(\theta-\beta)],$$

наклонить образец из фокусированного положения на угол  $\beta$ , равный  $68,5^\circ$ . Поскольку брегговский угол  $\theta_{104}$  используемой линии равен  $70,65^\circ$ , то угол "скольжения" дифрагированного пучка ( $\theta - \beta$ ) окажется в этом случае равным всего лишь  $2,15^\circ$ ; при этом наличие шероховатости и других морфологических искажений у облученной поверхности резко снизит воспроизводимость результатов измерения.

При отработке этой методики на образце с сильными повреждениями поверхности было получено полное подтверждение сказанному. Съемкой такого образца с наклонами на углы  $\beta$  в диапазоне от  $68,5$  до  $60^\circ$  установлено, что хорошая воспроизводимость результатов сопоставления форм линий у облученного и исходного образцов достигается при наклоне образца на угол не более  $63^\circ$ . Однако при таком угле  $\beta$  глубина  $z$  оказывается равной 1,6 мм, что втрое превышает необходимую глубину  $z_0 = 0,5$  мм.

В третьей методике необходимо предварительно выбирать материал и толщину экрана, накладываемого на поверхность рентгенографируемого образца. Так, в [8] при построении эпюры напряжений по глубине приповерхностного слоя алюминиевого образца в качестве экрана использовался набор (стопка) алюминиевых фольг, что позволяло дискретно (через 10 мкм) изменять толщину экрана от 10 до 160 мкм и, следовательно, уменьшать на такую же величину – от 10 до 160 мкм – глубину рентгенографирования образца. А в [9] при измерении напряжений в образцах карбида циркония двухсъемочным методом также использовалось экранирование алюминием: при наклоне образца на угол  $\beta$  съемка проводилась без экранирования, а в фокусированном положении – с экранированием, уменьшающим глубину  $z_{\text{max}}$  до глубины его рентгенографирования  $z_\beta$  при наклонной съемке. В связи с этим в третьей методике в качестве экрана были опробованы и Ве-пластины, и Al-фольги.

Отработка варианта третьей методики с экраном в виде стопки Ве-пластин выполнялась по следующей схеме. Исследуемый образец экранировался текстурированными Ве-пластинами, которые не давали отражений 104 (поверхности этих пластин были перпендикулярны оси текстуры). По мере увели-

чения толщины стопки пластин  $h_{\text{экр}}$  (по мере приближения  $h_{\text{экр}}$  к  $z_{\text{max}}$ ) интенсивность линии образца 104 падала до тех пор, пока не становилась меньше пятикратной амплитуды фона, что соответствовало полному выходу эффективного дифрагирующего объема из бериллиевого образца в бериллиевый экран [11]. В таких условиях удалось выяснить, что экспериментально найденная для бериллия глубины  $z_{\text{max}}$  равна 10,3 мм, что заметно больше, чем величина 6,6 мм, рассчитанная по формуле, в которой значение коэффициента  $A$  было выбрано равным 3,0. Экспериментальное найденное значение  $A$  в соответствии с формулой

$$A^{\text{эксп}} = 2\mu_{\text{экр}} h'_{\text{экр}} / \sin \theta,$$

в которой  $h'_{\text{экр}}$  есть толщина экрана в момент "исчезновения" линии, оказалось равным 4,65.

Отработка варианта третьей методики с экраном в виде стопки Al-фольг выполнялась по схожей схеме. Увеличением количества Al-фольг толщиной 10 мкм надо было достичь указанного выше результата полного выхода дифрагирующего объема из образца в Al-экран. Как оказалось, этот результат достигается при толщине стопки Al-фольг  $h'_{\text{экр}} = 170$  мкм. Используя эту величину, было еще раз определено экспериментальное значение  $A$ , которое на этот раз оказалось равным 4,74, т.е. экспериментально найденная для Ве глубины  $z_{\text{max}}$  на этот раз оказалась равной 10,5 мм и хорошо соответствующим глубине  $z_{\text{max}}$ , найденной при экранировании образца стопкой Ве-пластин в предыдущем варианте методики.

Для окончательной отработки третьей методики, т.е. для отработки процесса рентгенографирования только верхнего слоя на глубину  $z_0$ , равную 0,5 мм, необходимо в варианте методики с Ве-экраном закрыть образец Ве-накладкой толщиной 9,8 мм (найденная как разность глубин  $z_{\text{max}}$  и  $z_0$ , равных соответственно 10,3 и 0,5 мм), а в варианте методики с Al-экраном – 16 Al-фольгами (170 мкм алюминия полностью экранируют бериллий на глубину  $z_{\text{max}}$ , равную 10,5 мм, а для экранирования его на глубину  $(z_{\text{max}} - z_0)$ , равную 10,0 мм, необходимо соответственно 162 мкм алюминия). При проведении рентгеносъемок в указанных условиях было установлено очень сильное снижение интенсивности линии 104, не позволяющее выполнять надежное определение исследуемых характеристик бериллия. Установлено далее, что достаточная интенсивность линии фиксируется только при заметном уменьшении толщины экранов: толщину Ве-накладки надо уменьшить с 10,3 до 8,5 мм, т.е. исследовать образец на глубину 1,8 мм, а толщину стопки Al-фольг – со 170 до 140 мкм, т.е. исследовать образец на глубину 1,9 мм.

Полученный результат отработки третьей методики в точности повторяет результат отработки второй методики. Действительно, из-за большой глубины проникновения рентгеновского излучения в бериллий реализуется ситуация, когда необходимая

глубина  $z_0$ , равная 0,5 мм, оказывается намного (по уточненным данным даже не в 13, а примерно в 21 раз) меньше глубины  $z_{max}$ , равной ~10,4 мм, и поэтому реализация методики становится возможной только при увеличении глубины рентгенографирования  $z$  до ~1,9 мм, т.е. при почти четырехкратном превышении необходимой глубины  $z_0$ . В связи с этим от использования второй и третьей методик пришлось отказаться в пользу первой методики (методики со срезанием с образца одной пластины толщиной 0,5 мм), которая в определенном смысле уже прошла отработку и использование в исследованиях облученного бериллия еще на первом этапе работ.

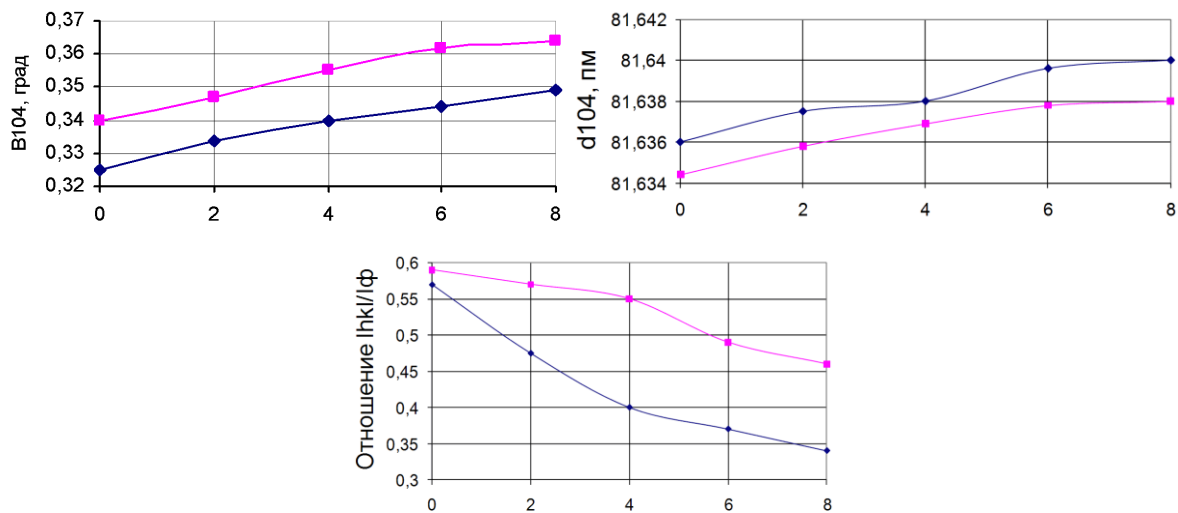


Рисунок 11. Характер изменения рентгеновских характеристик текстурированного (красные кривые) и бестекстурного (синие кривые) бериллия с увеличением количества электронных импульсов

Эти результаты (на рисунке представлены усредненные по трем измерениям для каждой пластины величины) достаточно убедительно указали на тот факт, что при электронном облучении бериллия процессы повреждения его структуры (повышения концентрации точечных дефектов, увеличения уровня микронапряжений и измельчения блоков мозаики, [10, 12]) и в бестекстурных, и в текстурированных образцах протекают в форме постепенного нарастания от импульса к импульсу. Таким образом, следует считать полностью установленным тот факт, что из двух основных вариантов развития поврежденности бериллия сильноточным электронным пучком (постепенное нарастание поврежденности материала от импульса к импульсу или же мощное повреждение в первом импульсе с последующим слабым его увеличением в последующих импульсах) реализуется первый – менее опасный – вариант деградации материала.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены поставленные в работе задачи и достигнута основная цель – исследовано поведение кандидатного материала первой стенки ИТЭР в услови-

При подготовке к исследованиям по этой методике с двух исходных и двенадцати облученных Вобразцов электроэрозионным способом были срезаны пластины толщиной ~0,65 мм, которые путем шлифовки со стороны среза они были утонены до толщины 0,5 мм. Дифрактометрические записи положения и формы линии 104 для каждой пластины производились трижды, причем перед второй и третьей записями линии осуществлялось некоторое смещение рамки с образцом вдоль держателя. После обработки профилей линий путем сглаживания шумов и вычитания  $K\alpha_2$ -составляющей было проведено определение полуширин линии  $B_{104}$ , межплоскостных расстояний  $d_{104}$  и отношений интенсивностей линии и фона  $I_{104}/I_{\phi}$  (рисунок 11).

ях, имитирующих возрастание количества срывов плазмы на первую стенку. По полученным в работе результатам можно сделать следующие выводы:

- при подготовке установки ГСЭП-3 к имитационным электрофизическим испытаниям текстурированных и бестекстурных бериллиевых образцов созданы усовершенствованные типы анодного и катодного узлов вакуумного диода установки, обеспечившие возможность равномерного облучения поверхностей бериллия удельными тепловыми потоками порядка 50 ГВт/м<sup>2</sup>;
- исследована динамика развития поврежденности поверхности текстурированного и бестекстурного бериллия с увеличением количества электронных импульсов и выяснено, что это увеличение вызывает (по данным визуальной оценки морфологического состояния поверхности, измерений распыления ее материала и рентгенографического определения уровня деградации структуры этого материала) постепенное нарастание поврежденности бериллия, причем как в условиях высокой (~14 Дж/см<sup>2</sup>), так и относительно невысокой (около 4 Дж/см<sup>2</sup>) плотности энергии облучения.



## ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курнаев, В. А. Взаимодействие плазмы с поверхностью / В. А. Курнаев. – М. : Изд. МИФИ, 2003. – 112 с. – ISBN 5-7262-0467-0.
2. Изменения на поверхности бериллия при воздействии высокопоточным электронным пучком в рамках исследований по программе ИТЭР / А. В. Гулькин, И. И. Дерявко, А. В. Маринин, Г. В. Шаповалов // Моделирование физико-химических процессов в физике конденсированного состояния : тезисы Междунар. конф., Актобе, 11–12 мая 2007. – Актобе, АГПИ МОН РК, 2007. – С. 26–27.
3. Эффекты радиационно-термического повреждения на поверхности бериллия при облучении высокопоточным электронным пучком / В. В. Бакланов, А. В. Гулькин, И. И. Дерявко, И. М. Кукушкин // Вестник НЯЦ РК. – 2007. – Вып. 3. – С. 91–95.
4. Гулькин, А. В. Радиационные повреждения поверхности бериллия при моделировании тепловых нагрузок в условиях облучения высокопоточным пучком электронов / А. В. Гулькин, И. И. Дерявко, Д. В. Постников // Ядерная и радиационная физика : докл. VI Междунар. конф., Алматы, 04–07 июня 2007. – Алматы, ИЯФ НЯЦ РК, 2007. – Т. 2. – С. 399–405.
5. Исследование повреждаемости материала защитного слоя первой стенки ИТЭР высокопоточным пучком электронов / В. В. Бакланов [и др.] // Ядерная энергетика Республики Казахстан. ЯЭ 2008 : доклады Междунар. конф., Курчатов, 11–13 июня 2008. – Курчатов, ИАЭ НЯЦ РК, 2009. – С. 139–144.
6. Рыбакова, Л. М. К методике исследования шероховатости поверхности скользящим пучком рентгеновских лучей / Л. М. Рыбакова, А. Н. Назаров // Зав. лаб. – 1978. – Т. 44, № 1. – С. 40–43.
7. Бекренев, А. Н. Определение толщины тонких покрытий с помощью наклонных рентгеновских съемок / А. Н. Бекренев, Б. Н. Федоров // Зав. лаб. – 1979. – Т. 45. – № 10. – С. 908–910.
8. Трофимов, В. В. Неразрушающий метод исследования напряженного состояния в поликристаллических материалах / В. В. Трофимов, Л. Я. Вагнер // Физ. и хим. обраб. материалов. – 1979. – № 5. – С. 112–114.
9. А. с. 1018497 СССР, МКИ<sup>4</sup> G 01 N 23/205. Способ рентгенографического измерения напряжений. / И. И. Дерявко, А. Г. Ланин (СССР). – № 2955710 ; заявлено 09.07.80 ; зарегистр. 14.01.83.
10. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я. С. Уманский [и др.]. – М. : Металлургия, 1982. – 632 с.
11. Васильев, Д. М. Анализ распределения напряжений в поверхностных слоях изделий без их разрушения / Д. М. Васильев, В. В. Трофимов // Физ. металлов и металловед. / ЛПИ. – 1975. – № 341. – С. 99–104.
12. Русаков, А. А. Рентгенография металлов / А. А. Русаков. – М. : Атомиздат, 1977. – 480 с.

**ГСЭП-3 ҚОНДЫРҒЫСЫНДА ИТЭР БІРІНШІ ҚАБЫРҒАСЫНЫҢ ҚОРҒАУ  
МАТЕРИАЛДАРЫН ЭЛЕКТРОФИЗИКАЛЫҚ СЫНАУ НӘТИЖЕЛЕРІ**

**Бакланов В.В., Дерявко И.И., Кукушкин И.М., Тарасенко Е.В.,**

*ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан*

Зерттеудің екінші кезеңінің күшті тоқты бір шоқ электрондардың импульсты сәулелену шарттарында бериллий тәртіп нәтижелері ұсынылды. Бұл кезеңде электронды сәулелену импульстер санының көбейуімен материал бұзылуын өсу динамикасы зерттелді.

**RESULTS OF ELECTROPHYSICAL TESTS OF THE PROTECTIVE  
MATERIAL OF THE FIRST WALL OF ITER AT THE FACILITY GSEP-3**

**V.V. Baklanov, I.I. Deryavko, I.M. Kukushkin, E.V. Tarasenko,**

*Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

The results of the second phase of research of beryllium behavior in condition of impulse irradiation by high-current electron beam are presented. At this stage, the dynamics of growth of material damage with the increasing number of electron radiation pulses is studied.

УДК 621.039.53

## ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННОГО РАЗОГРЕВА МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В РЕАКТОРОСТРОЕНИИ

Кенжин Е.А., Избасханова А.Т.

*Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

В данной статье, касающейся проблем обеспечения безопасной эксплуатации реакторных установок, рассмотрена необходимость проведения работы по изучению механизмов поведения конструкционных материалов под воздействием реакторного излучения путем тестирования материалов в условиях комплексного воздействия эксплуатационных факторов, т.е. в процессе работы реактора.

### ВВЕДЕНИЕ

К величайшим достижениям научной мысли прошлого столетия можно отнести освоение человеком атомной энергии, что стало переломным моментом для научно-технического прогресса, предоставив человечеству практически неисчерпаемый источник экологически чистой и экономически дешевой энергии. По сравнению с другими энерготехнологиями атомная энергетика обладает важными принципиальными особенностями, которые позволяют ей взять на себя существенную часть прироста энергетических нужд, стабилизируя и сокращая потребление органического топлива. Атомная энергетика, может стать устойчивым источником мирового энергообеспечения на многие десятилетия, открыв широкий простор для применения новейших передовых технологий и методов, связанных с использованием различных реакторных установок, все параметры которых оптимизированы по физике и требованиям обеспечения безопасной эксплуатации.

Такое особое внимание к безопасности атомной энергетике должно стать составной частью высокотехнологичной платформы международной энергетической системы нового поколения. На сегодняшний день можно отметить тенденцию, что практически каждая страна, использующая в мирных целях атомную энергию, как гарант своего развития, выбирает в качестве приоритета обеспечение безопасности при эксплуатации действующих и проектируемых АЭС. Проводятся верификации расчетных методик и программ, экспериментальное обоснование технических проектов, связанное с их экспертизой и лицензированием. Выполняются и разрабатываются новые программы исследований, создаются новые виды ядерного топлива, элементы и системы ядерных установок.

«Поведение» материалов, используемых в реакторостроении, в рабочих и различных аварийных ситуациях, является определяющим фактором, обеспечивающим безопасность реакторной установки. Таким образом, само получение экспериментальных данных о состоянии материалов в условиях нормальной эксплуатации и запроектных авариях, возможно только на исследовательских реакторах, становится чрезвычайно важной и актуальной проблемой. И одна из ключевых ролей в решении этой про-

блемы отводится экспериментальным исследованиям «поведения» конструкционных материалов, в результате которых предполагается получение дополнительной информации способной внести весомый вклад в обеспечение безопасности атомной энергетике. Работа, направленная на изучение механизмов поведения материалов при воздействии реакторного излучения, является необходимой и актуальной для решения задач в области физики твердого тела [1].

### ПОСТАНОВКА ОСНОВНЫХ ЗАДАЧ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Несмотря на большое количество работ, посвященных изучению воздействия нейтронного и гамма-излучений на конструкционные материалы, экспериментальных исследований радиационного разогрева на реакторах большой интегральной мощности до 2000 года не проводилось. Поэтому в том же году специалистами ИАЭ НЯЦ РК, РФЯЦ-ВНИИТФ, НИКИЭТ, РНЦ "Курчатовский институт" были начаты работы по подготовке исследований радиационного разогрева различных материалов, используемых в реакторостроении [2]. В 2002 году на базе импульсного графитового реактора ИГР были проведены первые эксперименты с химически «чистыми» образцами вольфрама, тантала, молибдена, циркония, железа, титана, олова, углерода, хрома, меди, свинца и никеля, а также с образцами сплава АМг-6, полиэтилена и свободных ХА- и ХК-термопар.

Испытания были проведены в импульсном графитовом реакторе ИГР, обладающем самым высоким флюенсом тепловых нейтронов ( $3,7 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>) и интегральной дозой гамма-излучения за пуск ( $4,78 \cdot 10^7$  рад) в значительной по объему центральной экспериментальной полости. Выбор в качестве экспериментальной базы реактора ИГР не был случайным, ведь задачи, которые решались и решаются в настоящее время с помощью реактора ИГР, разнообразны и охватывают различные области применения. Они практически всегда связаны с необходимостью получения экспериментальной информации о быстротекающих тепловых процессах в элементах конструкций и топливе ядерных реакторов, о поведении топлива и материалов, используемых в реакторостроении для определения пределов повреж-

даемости и их радиационной стойкости, обоснования их безопасной эксплуатации и т.д.

Реактор ИГР, предназначенный для получения высокой плотности потоков нейтронов и гамма-излучения, работает в режимах программируемых импульсов мощности на теплоемкости и по принципу гашения импульса является самогасящимся. Режимы его работы являются:

- нерегулируемый режим «Вспышка» – режим самогасящейся нейтронной вспышки;
- регулируемый режим «Импульс» с длительным (до нескольких сотен секунд) поддержанием заданного уровня мощности.

Конструктивно реактор ИГР представляет собой гомогенный аппарат с твердой уран-графитовой активной зоной и графитовым отражателем (рисунки 1 и 2) [3, 4].

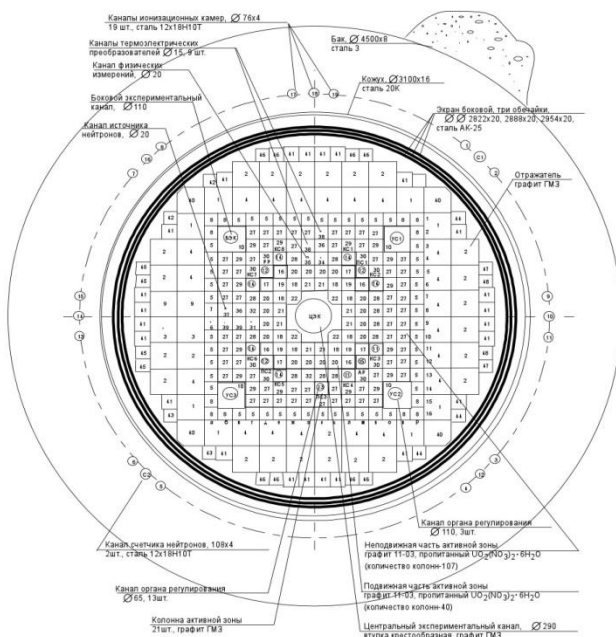
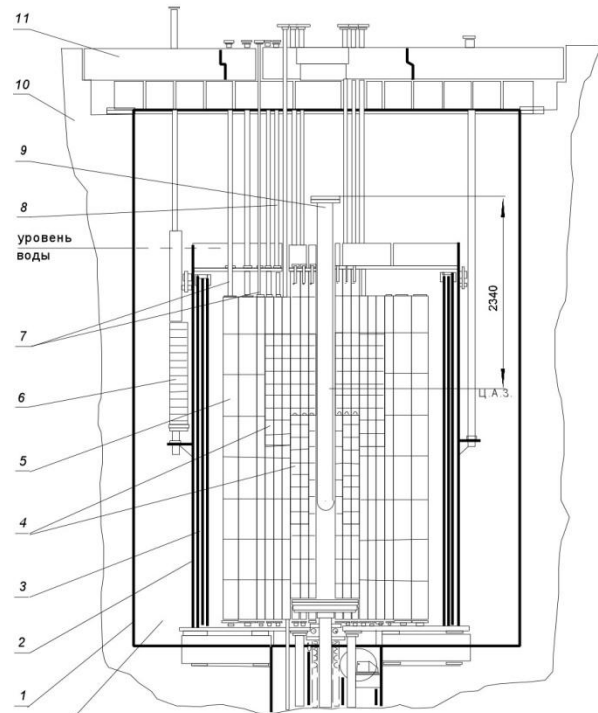


Рисунок 1. Горизонтальное сечение реактора ИГР (М 1:20)

Проведенные на базе реактора ИГР исследования процессов радиационного разогрева различных материалов рассматривались как методические, позволявшие уточнить конечные задачи планируемых исследований и ввести необходимые поправки и дополнения в постановку будущих экспериментов. Основной целью было получение информации о температурах разогрева материалов в реальном масштабе времени и оценка роли запаздывающего излучения. Одновременно отработывалась технология крепления термодатчиков в образцах, оценивалась помехоустойчивость системы регистрации и уровень электромагнитных наводок.

Как известно, радиационный разогрев происходит при взаимодействии нейтронов и гамма-квантов с ядрами материалов, а также при воздействии вторичных гамма-квантов, испускаемых ядрами при захвате нейтронов. Величины потерь энергии нейтронами в данных экспериментах вычислялись по про-



1- бак; 2- корпус; 3- тепловые экраны; 4- активная зона (неподвижная и подвижная части); 5- отражатель; 6- ионизационные камеры; 7- каналы измерения температуры активной зоны и отражателя; 8- каналы стержней регулирования; 9- центральный экспериментальный канал; 10- биологическая защита; 11- перекрытие верхнее; 12- полость охлаждающей воды.

Рисунок 2. Вертикальный разрез реактора ИГР (М 1:40)

граммам ПРИЗМА-Д и MCNP. Но так как потери энергии определяются из баланса энергии, в котором энергетический параметр, уносимый гамма-квантами известен плохо, а для многих материалов он принят равным нулю из-за отсутствия данных о гамма-образовании, то в результате этих расчетов были получены большие погрешности. Оказалось, что полные потери энергии от гамма-квантов, вычисленные по программе ПРИЗМА-Д с библиотекой БАС примерно на 10 % ниже, чем вычисленные по программе MCNP с библиотеками ENDF-B5 и ENDF-B6 и вычисленные на их основе температуры разогрева лучше соответствуют экспериментальным величинам. И хотя расчетные методики программы ПРИЗМА (ВНИИТФ) и американской программы MCNP примерно одинаковы, различие между ними состоит в их константной части, поэтому проведенные эксперименты были одновременно проверочными для используемых констант. Дело в том, что ал-

горитм расчета исследований радиационного разогрева в верификации не нуждается, но вот параметры, описывающие механизмы потерь энергии нейтронами и гамма-квантами, приводящие к разогреву материалов требовали уточнения. Именно такие процессы являлись объектом исследования в настоящей работе. Полученные результаты стали первыми экспериментальными данными за длительную историю эксплуатации реактора ИГР.

Известно, что данные по образованию гамма-квантов в нейтронных реакциях гораздо менее точны, чем сами сечения этих реакций. Для хорошо изученных элементов нейтронные сечения известны с точностью одного процента, а гамма-образование известно с точностью до десятков процентов. Для многих материалов имеются только теоретические оценки гамма-образования, отличающиеся для различных моделей программ в несколько раз. Результаты измерения температуры радиационного разогрева материалов в измеренном нейтронном и рассчитанном фотонном полях исследовательского реактора ИГР были использованы для проверки данных по образованию фотонов в нейтронных реакциях [5-9].

Необходимость анализа обширной информации о влиянии радиационного разогрева на характеристики материалов, используемых в реакторостроении, было обусловлено следующими причинами:

- опасностью хрупкого разрушения конструкций изделий с заранее не установленными границами работоспособности при внешних нагрузках;
- большим разбросом, а нередко и противоречивым характером экспериментальных данных, что делает необходимым изучение характеристик материалов в задачах радиационного разогрева, с целью установления границ их допустимого применения, т.е. прогнозирования решения проблем безопасности при работе любой реакторной установки.

И поэтому для изучения процессов в этой области было решено не останавливаться на достигнутом и провести дальнейшие исследования по радиационному разогреву материалов с уточнением и соблюдением всех требований к постановке экспериментов. Учитывая сложность облучательных устройств, их штучность и невозможность, как правило, повторения эксперимента с одним и тем же экспериментальным устройством, точность реализации режима работы реактора становится первостепенным фактором, определяющим успешный результат испытания. Ведь малейшие отклонения в величине энерговыделения, заданного для объекта испытания, могут стать причиной недогрева либо перегрева объекта испытаний и сделать эксперимент безрезультатным [2, 4, 5, 10, 11].

#### **ПУТИ РЕШЕНИЯ ОСНОВНЫХ ЗАДАЧ ПО РАДИАЦИОННОМУ РАЗОГРЕВУ МАТЕРИАЛОВ**

В настоящее время на базе реактора ИГР планируется проведение серии испытаний по исследованию радиационного разогрева, с целью получения экспериментальных значений пороговых удельных энерговыделений в материалах, используемых в реакторостроении, приводящих к деформации и разрушению. Предполагается проверить экспериментальным путем наиболее важные результаты предыдущей работы и получить экспериментальные данные для нового набора материалов.

Для обоснования перспективных реакторных испытаний обязательным условием является тестирование материалов в условиях комплексного воздействия факторов эксплуатации, т.е. в процессе работы реактора, реализация которого заключается в воздействии на необлученные материалы нейтронов и гамма-квантов. Эксперименты планируется проводить в несколько этапов – это должны быть дореакторные, реакторные и послереакторные исследования. Реакторная часть исследований будет проводиться в реакторе ИГР, при этом энерговыделение в пуске должно быть максимально приближено к расчетному значению. Эксперименты должны сопровождаться предтестовыми и посттестовыми материаловедческими исследованиями и численными анализами с использованием расчетных кодов ПРИЗМА-Д и MCNP.

В серии планируемых экспериментов в качестве образцов для исследований будут использованы: химически «чистые» материалы – тантал, медь, цирконий, бериллий, свинец, молибден, вольфрам, цинк, никель, кобальт, графит марок ГМЗ, 11-03 и АРВ-1, титановые сплавы ВТ-10 и ВТ-3, серебро и серебряный припой. В ходе подготовки новой серии экспериментов были изучены и приняты во внимание процессы, сопровождающие облучение образцов материалов в активной зоне реактора ИГР:

- радиационный разогрев материала образца (расчеты предыдущих экспериментов показывают, что для некоторых материалов внутренние слои разогреваются сильнее наружных слоев (для других материалов – наоборот) и затем происходит выравнивание температуры по всему объему образца, следовательно термометры в образцах должны быть установлены в поверхностном слое толщиной ~1,5 мм, чтобы в начальные моменты времени они смогли регистрировать температуру менее разогретого наружного слоя);
- радиационный разогрев «горячего» спая термометр и подводных проводов;

- процесс выравнивания температуры между внутренними и наружными слоями образца и между спаем термопары и массой образца;
- процесс остывания образца за счет теплообмена с окружающей воздушной средой.

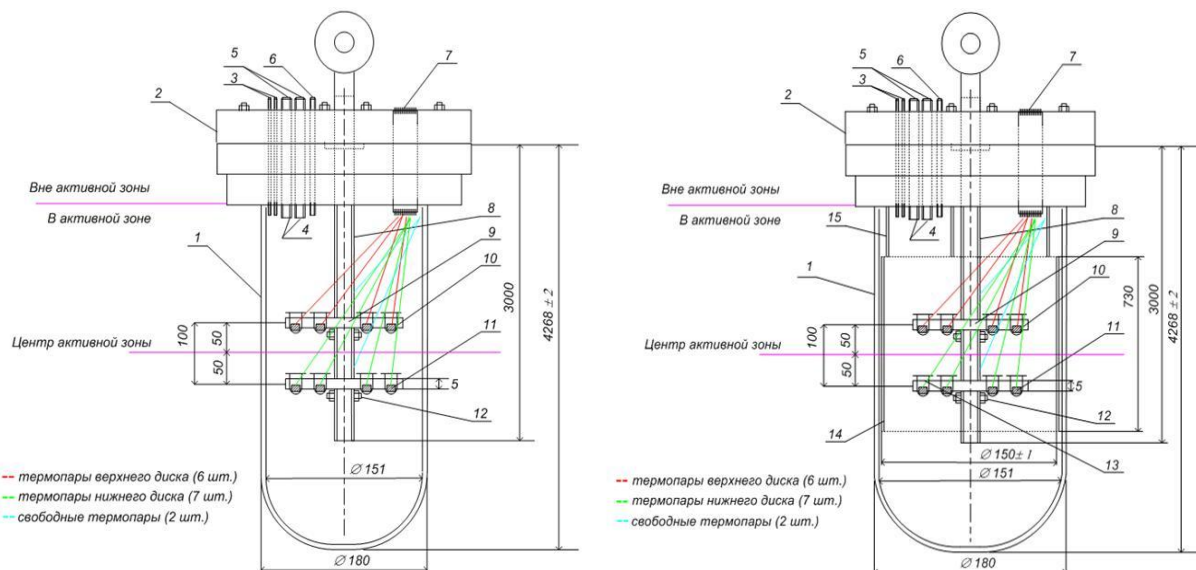
Необходимо также учитывать, что основной разогрев уран-графитовых блоков реактора ИГР происходит за счет деления  $^{235}\text{U}$ , дополнительный – в результате радиационного разогрева графита нейтронами и гамма-квантами. Технология пропитки графитовых блоков ураном такова, что содержание урана изменяется от блока к блоку в пределах около 10 % и это неизбежно сказывается на температуре разогрева. При интерпретации результатов измерения температуры следует принять во внимание, что остаточное энерговыделение вспышки и запаздывающее гамма-излучение вносят заметный вклад в радиационный разогрев. При вычислении температуры разогрева одной из важнейших величин является абсолютное энерговыделение (число делений в активной зоне), которым будут облучены образцы материалов. В процессе проводимых на реакторе испытаний основное внимание следует обратить на измерение флюенса нейтронов, падающих на образец, т.е. на ввод энергии в образец.

В части проведения экспериментов основные усилия необходимо направить на:

- повышение точности и обоснование погрешностей экспериментальных результатов – надежной регистрации остаточного энерговыделения вспышки;
- подготовку образцов исследуемых материалов с учетом всех требований предъявляемых к ним, в особенности по геометрическим размерам – не более  $1\text{ см}^3$  и массам – не более 15 г;
- использование более тонких и, следовательно, менее инерционных термопар;
- отработку технологии термометрирования образцов для более качественного теплового контакта спая с материалом образца. Закрепление термопарных спаев в исследуемых образцах должно быть выполнено зачеканиванием, но при этом в процессе установки термопар необходимо соблюдать осторожность, так как небольшие размеры, а также хрупкость многих исследуемых образцов в момент зачеканивания могут привести к разрушению материалов [5, 6, 12].

В настоящее время для реализации планируемых исследований выполнены работы:

1. Разработано экспериментальное устройство в двух модификациях (рисунок 3).



1 – корпус - силовой чехол в сборе, 2 – крышка с экспериментальной навеской, 3 – разъемы датчиков, 4 – нижний штуцер, 5 – верхний штуцер, 6 – штуцер, 7 – гермопроходник, 8 – регулировочный стержень, 9 – диск, 10 – кварцевый ложемент, 11 – образец исследуемого материала, 12 – стопорный винт, 13 – термопары, 14 – обечайка, 15 – трубка

Рисунок 3. Экспериментальные устройства PP-1 и PP-2

ЭУ PP-1 и PP-2 предназначены для внутриреакторных исследований радиационного разогрева образцов материалов излучением реактора ИГР и отличаются друг от друга наличием в ЭУ PP-2 обечайки, выполненной из нержавеющей стали марки 12X18Н10Т. Обечайка предназначена для изменения соотношения между флюенсом нейтронов и гамма-

излучения в образцах. Экспериментальные устройства вносят минимальное искажение в нейтронное и гамма-поле в канале реактора ИГР. ЭУ позволяют одновременно облучать до 16 образцов, которые устанавливаются в сборку таким образом, чтобы минимизировать взаимное тепловое влияние и обеспечить режим калориметрического измерения. Каж-

дый образец электрически изолирован друг от друга, что обеспечивается кварцевыми изоляторами. Известно, что некоторые марки технических кварцев, керамик и высокотемпературных стекол, применяемых для электроизоляции термопар, содержат небольшие примеси природного бора. При подготовке к экспериментам предварительно на реакторе ИГР был проведен пуск в режиме «Вспышка», на котором термопары с изоляторами из кварцевого стекла, содержащего около 0,7 % бора, были расплавлены, вследствие чего результаты измерений температуры были сильно искажены. Поэтому в качестве материала для ложементов и изоляторов выбран кварц КС-4В. Проведенный спектральный анализ показал, что в кварце КС-4В практически отсутствуют примеси материалов, поглощающих нейтроны. Контрольное облучение подтвердило возможность использования кварца КС-4В в качестве материала для ложементов и изоляторов.

2. Для уменьшения потерь тепла от образца при его остывании было принято одно из возможных решений – помещение всего экспериментального устройства в вакуум для замедления процесса остывания, уменьшения потерь тепла и, следовательно, более надежной верификации программы расчета радиационного разогрева.

3. Подготовлены измерители температуры, в качестве которых используются термоэлектрические преобразователи (термопары) типа хромель-копель (длиной примерно по 3,5 м). ХК-термопары изготовлены из проводов диаметром 0,5 мм. Средний диаметр их спая около 1,5 мм. Все термопары на высоте ~1000 мм от «горячего» спая имеют в качестве электроизоляции «бусы», выполненные из кварца КС-4В. Остальные 2500 мм термопарного провода изолированы трубками ПХВ.

4. Подготовлены для облучения образцы исследуемых материалов (набор из 16 различных материалов в форме цилиндров и кубов). Проведены измерения гидростатической плотности представленных образцов и проведен сравнительный анализ с литературными источниками [5, 13, 14].

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате планируемых экспериментов будет предложено решение одной из ключевых проблем безопасности ядерного реактора – перспективная логика обеспечения безопасности путем определения критических эксплуатационных пределов для тестируемых материалов, т.е. один из путей исключения этой проблемы. В ходе проведения вне реакторных и реакторных исследований будет получена ценная информация о поведении исследуемых материалов.

Известно, что нейтронное облучение вызывает изменение свойств материалов, используемых в реакторостроении. В целях прогнозирования степени деградации материала, обусловленной облучением, планируется проводить данные измерения. Экспериментальные исследования покажут термомеханическое поведение исследуемых материалов и позволят определить значения их деформации и параметры разрушения. По окончании экспериментальных работ будет проведен анализ полученных результатов и дана оценка степени деградации материалов, основанная на изменениях свойств материалов вследствие облучения, в зависимости от температуры радиационного разогрева и данных по распределению плотности потока нейтронов (или флюенса тепловых нейтронов) по высоте активной зоны реактора ИГР. То есть будут получены экспериментальные данные для тестирования и верификации ядерных констант разных библиотек в задачах радиационного разогрева. По результатам расчетов могут быть выявлены те элементы, для которых данные по гамма-образованию нуждаются в уточнении. Неточность в реализации заданного энерговыделения, может стать причиной недогрева либо перегрева объекта испытаний и сделать эксперимент безрезультатным.

Результаты измерений температуры радиационного разогрева реакторных материалов полученных по окончании планируемых экспериментов также будут использоваться при проектировании экспериментальных устройств испытываемых на реакторе ИГР. Такая необходимость возникает тогда, когда в результате облучения изменяется конфигурация опыта и меняются расстояния между сочлененными частями облучаемой конструкции, в том числе из-за их разного теплового расширения. Для надежной постановки экспериментов на реакторе и интерпретации результатов необходимо знать температуру радиационного разогрева используемых материалов при столь сильном воздействии нейтронного и гамма-излучения. При этом расчетное значение подводимого тепла, критического с точки зрения повреждения целостности конструкции, должно быть согласовано с результатами проводимых экспериментов. Предлагаемая модель для испытания применима для прогнозирования поведения реакторных материалов, используемых в реакторостроении, в результате их облучения на реакторных установках с различными интервалами энерговыделения. Полученные в результате экспериментальных исследований данные позволят создать принципиальные подходы к конструированию (путем комбинирования) материалов нового поколения, которые будут обладать требуемым набором свойств, необходимым для использования в различных реакторных установках [1, 10, 11, 15].



**ЛИТЕРАТУРА**

1. Panin, V. E. Modern problems of material science and technology of materials and coatings / V. E. Panin, A. L. Slosman // Text book. – Tomsk, 2003. – Part 1. – P. 66–69.
2. Измерение температуры радиационного разогрева конструкционных материалов излучением ИГР / Н. В. Горин [и др.] // Атомная энергия. – 2001. – Т. 90, вып. 1. – С. 17–21.
3. Реакторные комплексы ИГР, "Байкал-1", ВВР-К и перспективы развития на их базе фундаментальных и прикладных исследований / Э. С. Айткожин [и др.] – Курчатов : НЯЦ РК, 2000. – 75 с.
4. Обзор результатов исследований импульсного реактора ИГР : отчет о НИР (промежут.) / ФГУП РФЯЦ-ВНИИТФ ; рук. Н. В. Горин. – Снежинск, 2002. – 81 с. – Рег. № ПС.98.7816.
5. Результаты измерения радиационного разогрева конструкционных материалов излучением реактора ИГР : отчет о НИР (промежут.) / ВНИИТФ ; рук. Н. В. Горин. – Снежинск, – 2000. – 59 с. – Рег. № ПС.00.7958.
6. Обработка результатов эксперимента по измерению температуры радиационного разогрева материалов излучением ИГР / Н. В. Горин [и др.] // Изв. Челябинского научного центра. – 2002. – Вып. 4(17). – С. 21–27.
7. Monte-Carlo simulation in nuclear geophysics. Incomparision of the PRIZMA Monte-Carlo Program and benchmark experiments / M. A. Arnautova [et al.] // Nucl. Geophys. – 1993. – Vol. 7, № 3. – P. 407–418.
8. NJOY91.38 A code system for producing pointwise and multigroup neutron and photon cross-section from ENDF/B evaluated date. – RSIC code package PSR-171.
9. RSIC computer code collection, MCNP-4A. Monte-Carlo N-Particle Transport Code System / Oak Ridje National Laboratory contributed by Los Alamos National Laboratory. – Los Alamos – New Mexico.
10. Герасимов, В. В. Материалы ядерной техники / В. В. Герасимов, А. С. Монахов. – М. : Атомиздат, 1973. – 288 с.
11. Зиновьев, В. Е. Теплофизические свойства материалов при высоких температурах / В. Е. Зиновьев. – М. : Металлургия, 1989. – 318 с.
12. Верификация методик расчета характеристик импульсного уран-графитового реактора : отчет о НИР (промежут.) / ВНИИТФ ; рук. А. П. Васильев. – Снежинск, 1998. – 62 с. – Рег. № ПС.98.6920.
13. Исследование распределения потока тепловых нейтронов по высоте ЦЭК реактора ИГР : отчет о НИР (промежут.) / ВНИИТФ ; рук. Н. В. Горин. – Снежинск, 1999. – 59 с. – Рег. № ПС.98.7025.
14. Кандиев, Я. З. Обзор результатов исследований импульсного реактора ИГР / Я. З. Кандиев [и др.] // Атомная энергетика и безопасность АЭС. – Март 2003. – Вып. 1. – С. 58–63.
15. Чиркин, В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / В. С. Чиркин. – М. : Атомиздат, 1968. – 484 с.

**РЕАКТОР ЖАСАУДА ПАЙДАЛАНАТЫН,  
МАТЕРИАЛДАРДЫҢ РАДИАЦИЯЛЫҚ ЖЫЛЫТУ ЗЕРТТЕУЛЕРІ**

**Кенжин Е.А., Избасханова А.Т.**

*ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан*

Реакторлық қондырғыларды қауіпсіз пайдаланудың қауіпсіздік мәселесіне қатысты, бұл мақалада пайдаланатын факторлардың кешенді әсер ету шарттарында материалдарды тестілеу жолымен реакторлық сәулелендіру әсерімен конструкциялық материалдардың тәртіп механизмын білу бойынша жұмысты жүргізу қажеттілігі қарастырылды, яғни реактордың жұмыс процесінде.

**RESEARCHES OF RADIATION HEATING OF MATERIALS USED IN NUCLEAR REACTOR INDUSTRY**

**Ye.A. Kenzhin, A.T. Izbaskhanova**

*Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

In this paper relating to the safe operation of reactor facilities, necessity of work conduction on study of mechanisms of constructional materials behavior under the influence of reactor radiation through the testing of materials in conditions of an integrated effect of operational factors, i.e. during the reactor operating.

УДК 002.53; 002.53:004.65; 002.53:004.62/.63

## РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ БАЗЫ ДАННЫХ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ЗНАЧЕНИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ИИС ИВГ-1 М

Уханов С.В.

*Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов*

В результате выполненной работы разработана модель реляционной базы данных для регистрации экспериментальных данных, хранения метрологических характеристик и пороговых значений предупредительной и аварийной сигнализации, которая позволит эффективно проводить постэкспериментальное использование информации, минимизировать затраты на дисковое пространство. Данная модель должна быть реализована в СУБД с клиент-серверной архитектурой. Разработанная модель на этапе отладки прикладного программного обеспечения позволит провести эксперименты по реализации структуры на различных платформах систем управления базами данных. Отработано взаимодействие с эмулятором контроллера - как регистрация различных типов данных, так и загрузка значений в эмулятор. Разработанная модель предоставляет широкий выбор средств постэкспериментальной обработки, представления информации в различных видах, обеспечивает гибкое распределение прав на доступ к информации и обладает мощными средствами резервирования и восстановления данных в результате сбоев. Экспериментальные данные в дальнейшем могут быть интегрированы в любую информационную систему в качестве отдельного интерфейса, что предоставляет широкие возможности использования в научных исследованиях и на различных этапах предпусковой подготовки.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ведутся работы по переоснащению и реконструкции информационно измерительной системы (ИИС) на реакторе ИВГ-1 М. Измерительная система, функционирующая долгие годы технически устарела, не соответствует современным требованиям и нуждается в модернизации. Одним из этапов работ по реконструкции является проектирование базы данных реакторных экспериментов.

Проектируемое хранилище экспериментальных данных, должно обеспечивать:

- быстрый поиск и анализ информации научными сотрудниками
- оптимальное хранение и резервное копирование данных
- использование показаний измерительных каналов для WEB представления и основы для приложений анализирующих экспериментальные модели
- хранение пределов измерений, уставок пороговой и аварийной сигнализации для измерительных каналов
- общую интеграцию с подсистемами ИИС.

Необходимым требованиям соответствуют промышленные системы управления базам данных (СУБД), которые позволяют хранить большие объёмы информации, имеют возможность быстро обрабатывать множество SQL-запросов, обладают мощными средствами резервирования и восстановления данных.

При создании хранилища, особое внимание необходимо уделить проектированию структуры реляционной базы данных, что позволит избежать избыточности информации в таблицах, тем самым позволит экономить дисковое пространство, обеспечит более высокую производительность запросов. Теория проектирования реляционных баз данных обла-

дает мощной теоретической частью и развитым математическим аппаратом, что позволило, используя основные требования разработать оптимальную модель хранения данных.

Важным этапом работы является выбор СУБД, от правильности которого зависят методы дальнейшей обработки данных, систематизации и резервирования информационных массивов. В результате выполнения работы необходимо провести экспорт готовой модели в СУБД, анализ сущностей и атрибутов, системы отношений модели, на соответствие выбранной системе управления базами данных, а также провести моделирование процессов заполнения базы экспериментальными данными, загрузки уставок и пределов измерений в эмулятор контроллера, отладка различных способов взаимодействия эмулятора контроллера и модели.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

На данном этапе были определены функции, которые должна выполнять будущая база данных, ее пользователи. Определён перечень измерительных каналов подлежащих регистрации. Также проанализированы пути постэкспериментальной обработки информации.

Измерительные каналы ИИС.

- Каналы системы КИПиА - системой контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА)
- Каналы системы СУЗ - системой управления и защиты
- Каналы системы САУ - системой автоматического управления
- Каналы системы СКГО - система контроля герметичности оболочек
- Каналы системы ДК - системой дозиметрического контроля

База данных должна выполнять следующие функции:

- хранение данных однозначно идентифицирующих любой измерительный канал в ИИС в соответствии с типом подсистемы, первичного преобразователя (датчика, реле или прочего оборудования), нормирующего преобразователя, граничных значений (уставок);
- хранение метрологических характеристик измерительных каналов ИИС, используемых в процессе проведения метрологической проверки и предварительной обработки данных
- хранение архивной информации по технологическим параметрам в ходе эксперимента, а также данных по всем проводимым экспериментам с возможностью полного восстановления эксперимента на всем его протяжении;
- регистрацию показаний каналов на протяжении пуска.

Типы приложений использующих базу данных в пределах интрасети РГП НЯЦ РК.

- Web приложения для коллективного пользования
- Редакторы справочной информации
- Приложения для анализа экспериментальных данных с развитым графическим интерфей-

сом (построение графиков и диаграмм) и математическим аппаратом.

Пользователи базы данных:

- Обслуживающий персонал: обеспечение безотказной работы ИИС, проверка актуальности справочной информации, перед загрузкой конфигурации обновляющей теги контроллера.
- Программисты, системные инженеры: создание приложений использующих данные для интуитивно понятного анализа данных, коллективного пользования.
- Научные сотрудники: анализ и исследование экспериментальных данных, построение и сравнение моделей с теоретическими расчётами.

Тип передаваемой информации:

- входные аналоговые сигналы – не менее 540;
  - входные дискретные сигналы – не менее 365;
- Аналоговые сигналы – вещественные числа, дискретные сигналы – логические значения.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУЩНОСТЕЙ

Сущность - реальный или представляемый объект, информация о котором должна сохраняться и быть доступна.

Определены объекты базы данных и логические связи между ними.

*Таблица 1. Сущности БД*

Название сущности	Описание
Система	Справочная информация о системе
Узлы системы	Справочная информация о контроллере определённой системы
Модули	Информация, характеризующая платы ввода-вывода определённого контроллера
Каналы	Информация, характеризующая информационные каналы определённой платы ввода-вывода
Типы датчиков	Информация по типам датчиков, хранение метрологических характеристик датчиков
Значения датчиков	Содержит значения показаний информационных каналов
Теги	Обеспечивает связку справочной и регистрирующей частей БД. Содержит имена тегов на контроллере и их описание
Ограничения	Информация по граничным значениям определённых типов датчиков
Регистрирующие контроллеры	Содержит сведения об активности контроллеров.

Связь - это графически изображаемая ассоциация, устанавливаемая между двумя сущностями. Эта ассоциация всегда является бинарной и может существовать между двумя разными сущностями или между сущностью и ей же самой (рекурсивная связь).

Определены связи между сущностями. Сущности и связи изображены на рисунке 1.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ АТТРИБУТОВ СУЩНОСТЕЙ

*Атрибут* – поименованная характеристика сущности. Наименование атрибута должно быть уникальным для конкретного типа сущности, но может быть одинаковым для различного типа сущностей. Атрибутом сущности является любая деталь, которая служит для уточнения, идентификации, классификации, числовой характеристики или выражения состояния сущности.

*Кортеж* — группа взаимосвязанных элементов данных.



*Рисунок 1. Сущности и связи*

В соответствии с теорией реляционных баз данных сущности должны отвечать следующим требованиям:

- В отношении нет одинаковых кортежей
- Каждый атрибут имеет уникальное имя
- Элементы данных атрибута однородны
- Все значения атрибутов атомарны.

Построенная модель удовлетворяет требованиям 3 НФ (нормальной форме).

Третья нормальная форма (3НФ) – состояние сущности, при котором она находится во второй нормальной форме, и при этом любой её неключевой атрибут функционально зависит только от первичного ключа.

Данная модель обеспечит наилучший вариант хранения данных, улучшит производительность запросов.

### РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ

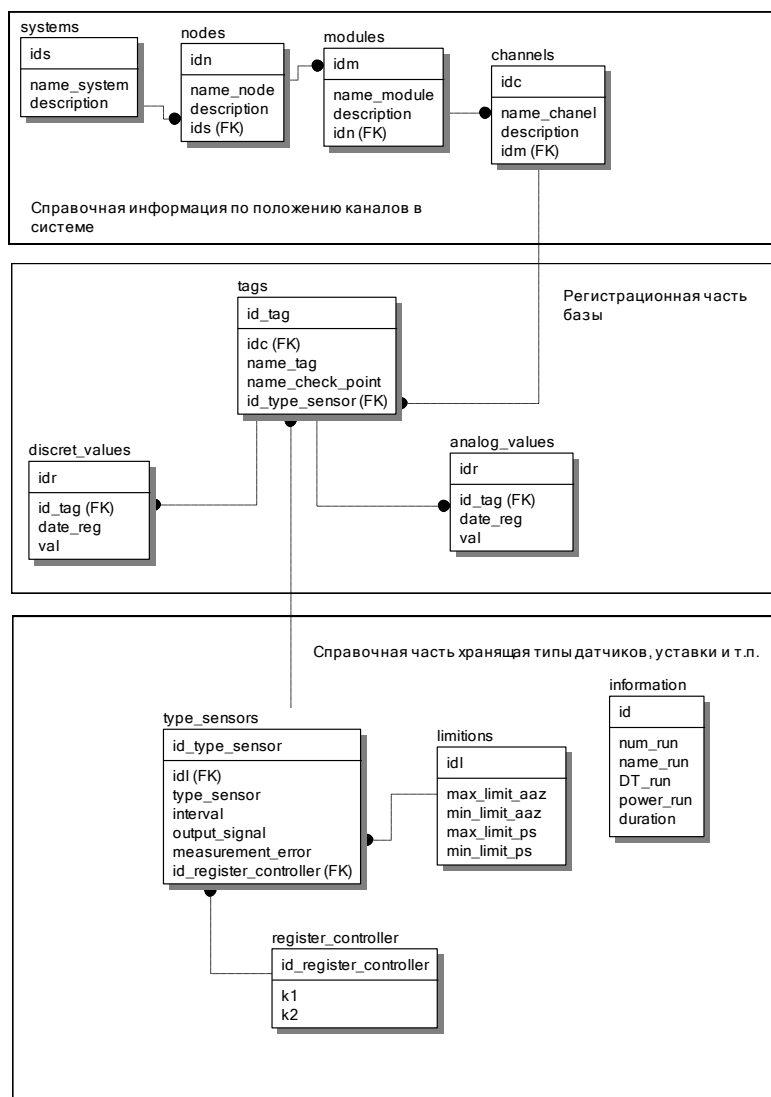
Логически база данных делится на 2 части – регистрационная и справочная:

Регистрационная часть служит для получения и хранения значений измерительных каналов, спра-

вочная содержит значения уставок и имена тегов RSLogix. Основной объём базы данных будет приходиться на регистрационную часть, в частности на таблицу, принимающую аналоговые значения каналов ИИС.

Существует множество различного программного обеспечения, которое служит для разработки моделей баз данных. Разработка модели проводилась в среде Erwin Data Modeler. Данное средство является универсальным средством проектирования баз данных, создания моделей, оценки размера и составления документации к моделям. Также с помощью данного приложения можно экспортировать готовую модель в одну из популярных СУБД.

На рисунке представлена физическая модель базы данных. На данном этапе моделирования определены связи и ключевые атрибуты, размерность и типы полей для определённой СУБД. При тестовой регистрации каналов эмулятора была использована СУБД MS SQL SERVER 2005.



*Рисунок 2. Физическая модель базы данных*

### ОЦЕНКА РАЗМЕРА БАЗЫ ДАННЫХ

При разработке БД проведены расчёты, определяющие предполагаемый объём базы данных. Необходимо определить размер дискового пространства, занимаемый данными и индексами в целях обеспечения соответствующего объёма на диске, расчёта производительности, затрат ресурсов, необходимых для безотказной работы приложений.

Расчёт планируемого объёма таблицы БД проводится по следующему алгоритму:

- Вычисление объёма «кучи»
- Вычисление объёма индекса
- Сложение объёма кучи и объёма индекса.

Для расчёта объёма таблицы необходимо количество строк.

Количество каналов сбора и регистрации информации и каналов управления:

- Входные аналоговые сигналы – не менее 540;
- Входные дискретные сигналы – не менее 365;
- Период опроса каналов, с –1; 10; 20;
- Максимальное время регистрации - не менее 10 часов;
- Количество серверов регистрации - не менее 2.

Часть строки, называемая битовой картой NULL, зарезервирована для управления свойством столбца принимать значение NULL:

$$NB = 2 + ((N_{FIXED\_COL} + N_{VAR\_COL} + 7) / 8) \quad (1)$$

Где  $N_{FIXED\_COL}$  - количество столбцов фиксированной длины;  $N_{VAR\_COL}$  - количество столбцов фиксированной длины.

В таблицах отсутствуют столбцы переменной длины, следовательно  $N_{VAR\_COL} = 0$ . При вычислениях используется только целая часть битовой карты.

$$NB = 2 + ((4+0+7)/8) = 2+1,375 = 3,375 \approx 3$$

Объём строки таблицы:

$$V_{ROW} = \sum_{FIXED\_COL} + \sum_{VAR\_COL} + NB + 4 \quad (2)$$

где  $\sum_{FIXED\_COL}$  - объём столбцов постоянной длины;

$\sum_{VAR\_COL}$  - объём столбцов переменной длины;

$NB$  - битовая карта; значение 4 в формуле — это служебные данные заголовка строки данных.

Таблица 2. Расчёт количества строк

Название таблицы	Количество каналов	Период опроса(сек)	Время регистрации(ч)	Количество строк
Таблица с аналоговыми значениями	540	1	10	$19,4 \times 10^6$
Таблица с дискретными значениями	365	1	10	$13,4 \times 10^6$

Таблица 3. Типы данных и занимаемый объём

Таблица с аналоговыми значениями		
Название столбца	Тип столбца	Размер столбца(байтах)
Идентификатор транзакции	Int	4
Идентификатор тега	Int	4
Значение	Real	4
Время	Datetime	8
Таблица с дискретными значениями		
Идентификатор транзакции	Int	4
Идентификатор тега	Int	4
Значение	Bit	1/8(0)
Время	Datetime	8

Объём строки для таблицы с аналоговыми значениями:

$$V_{ROW} = 20 + 0 + 3 + 4 = 27 \text{ байт} \quad (2)$$

Объём строки для таблицы с дискретными значениями:

$$V_{ROW} = 16 + 0 + 3 + 4 = 23 \text{ байт} \quad (2)$$

Количество строк на страницу

$$N_{ROWS\_PER\_PAGE} = 8096 / (V_{ROW} + 2) \quad (3)$$

где 8 096 - число свободных байт на страницу;  $V_{ROW}$  - объём строки

Количество строк на страницу для таблицы с аналоговыми значениями:

$$N_{ROWS\_PER\_PAGE} = 8096 / (27+2) \approx 279$$

Количество строк на страницу для таблицы с дискретными значениями:

$$N_{ROWS\_PER\_PAGE} = 8096 / (23,125+2) \approx 322$$

Количество страниц

$$N_{PAGE} = N_{STR} / N_{ROWS\_PER\_PAGE} \quad (4)$$

где  $N_{STR}$  - количество строк в таблице;

$N_{ROWS\_PER\_PAGE}$  - Количество строк на страницу; количество страниц должно быть округлено в большую сторону до ближайшей целой страницы.

Количество страниц для таблицы с аналоговыми значениями:

$$N_{PAGE} = 19,4 \times 10^6 / 279 = 69677.$$

Количество страниц для таблицы с дискретными значениями:

$$N_{PAGE} = 13.14 \times 10^6 / 322 = 40807.$$

Размер пространства, требуемого для хранения данных в куче (всего 8192 на страницу)

$$V_{NONCL} = 8192 \times N_{PAGE} \quad (5)$$

Объём кучи таблицы с аналоговыми значениями

$$V_{analog} = 8192 \times 69677 / 1024 / 1024 \approx 544 \text{ мегабайта.}$$

Объём кучи таблицы с аналоговыми значениями

$$V_{disk} = 8192 \times 40807 / 1024 / 1024 \approx 319 \text{ мегабайт.}$$

С помощью средства оценки размеров базы данных Volumetrics Erwin был вычислен общий размер индексов таблиц с дискретными и аналоговыми значениями:

$$V_{INDEX\_END} \approx 90 \text{ мегабайт.} \text{ – для обеих таблиц.}$$

Следовательно общий объём основных таблиц составил:

$$V_{ИИС} \approx 1053 \text{ мегабайта.}$$

### ОПИСАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С RSSql

RSSql – это система обработки транзакций на платформе Windows NT, обеспечивающая двуна-

правленную связь между информационно-измерительными системами и системами баз данных. Со стороны управления RSSql может подключаться к RSVIEW, RSLinx, или любому серверу AdvancedDDE или OPC. Со стороны БД RSSql может подключаться к любой согласующейся с ODBC базой данных через прямой интерфейс вызовов(OCI).

Транзакция – это группа последовательных операций, которая представляет собой логическую единицу работы с данными. В зависимости от типа транзакций связь может в режиме реального времени, либо в режиме очередности. Транзакции RSSql подразделяются на:

- Однонаправленные;
- Двунаправленные.

Однонаправленные – транзакции передающие значения на сервер баз данных.

Двунаправленные – транзакции возвращающие информационно-измерительной системе значения из хранимых процедур на сервере баз данных.

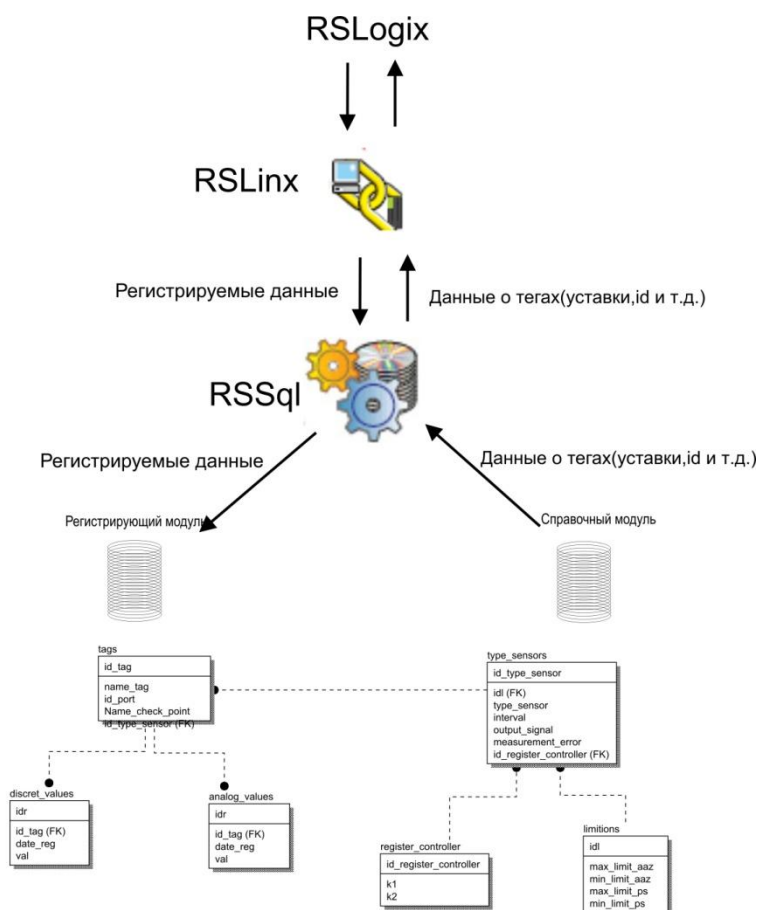


Рисунок 3. Схема взаимодействия

Существует 2 типа связи с СУБД:

- Связь на основе очередности;
- Связь в режиме реального времени.

Связь на основе очередности – связь, позволяющая администратору транзакций записывать их в систему



очередей на диске, в результате чего система связи с базой данных обрабатывает их более эффективно.

Связь в режиме реального времени – связь обеспечивающая прямое взаимодействие между информационно-измерительной системой и СУБД в режиме реального времени.

Запись показаний информационных каналов в базу данных эффективнее проводить с помощью транзакций регистрационного типа. Транзакции регистрационного типа используют связь на основе очередности. Это позволяет снизить нагрузку на сервер базы данных и позволяет достичь больших скоростей записи данных.

Загрузку метрологических характеристик измерительных каналов ИИС необходимо проводить с помощью двунаправленных транзакций.

Взаимодействие с базой данных ИИС делится на 2 этапа:

- Загрузка метрологических характеристик и уставок из справочной части БД
- Регистрация значений измерительных каналов

Загрузка данных на контроллер обеспечивается при помощи двунаправленных транзакций принимающих значения из хранимых процедур БД ИИС.

Информация, поступающая от системы управления, может дополнительно обрабатываться перед вставкой в БД – это обеспечивает редактор выражений.

Редактор выражений RSSql – мощное средство, обладающее определённым набором математических и статистических функций для обработки информации перед передачей данных в таблицу, либо хранимую процедуру. Редактор выражений в БД ИИС используется для определения полного имени тега, однозначно идентифицирующего его положение в системе, получения времени показания измерительного канала.

Ссылочная целостность БД, при передачи данных в таблицы регистраций обеспечивается при помощи соответствия данных таблицы tags(теги) списку тегов контроллера. Таблица tags является полным списком тегов контроллера, связана со справочным модулем БД ИИС и обеспечивает идентификацию канала ИИС в соответствии с типом подсистемы.

Обновление граничных значений (уставок) обеспечивают транзакции двунаправленного типа. Двунаправленные транзакции используют хранимые процедуры для передачи значения системе управления.

Входным параметром является имя тега, выходными параметрами – уставки, уникальные идентификаторы тега в системе. Количество выходных параметров зависит от типа тега, поэтому необходимо создание группы хранимых процедур для определённых групп тегов.

Примером хранимой процедуры может послужить рисунок 4.

```

set ANSI_NULLS ON
set QUOTED_IDENTIFIER ON
go

ALTER PROCEDURE [dbo].[full_update_tag] ( @name_tag_in          VARCHAR(100)
                                        @tags_id_tag          INTEGER          OUT,
                                        @limitations_max_limit_aaz DOUBLE PRECISION OUT,
                                        @limitations_min_limit_aaz DOUBLE PRECISION OUT,
                                        @limitations_max_limit_ps DOUBLE PRECISION OUT,
                                        @limitations_min_limit_ps DOUBLE PRECISION OUT
)
AS

SELECT @tags_id_tag = tags.id_tag,
       @limitations_max_limit_aaz = limitations.max_limit_aaz,
       @limitations_min_limit_aaz = limitations.min_limit_aaz,
       @limitations_max_limit_ps = limitations.max_limit_ps,
       @limitations_min_limit_ps = limitations.min_limit_ps
FROM   limitations INNER JOIN
       tags ON type_sensors ON limitations.id_l = type_sensors.id_l INNER JOIN
       tags ON type_sensors.id_type_sensor = tags.id_type_sensor
WHERE  tags.name_tag = @name_tag_in
    
```

Рисунок 4. Хранимая процедура

Выходные параметры привязываются к параметрам тега.

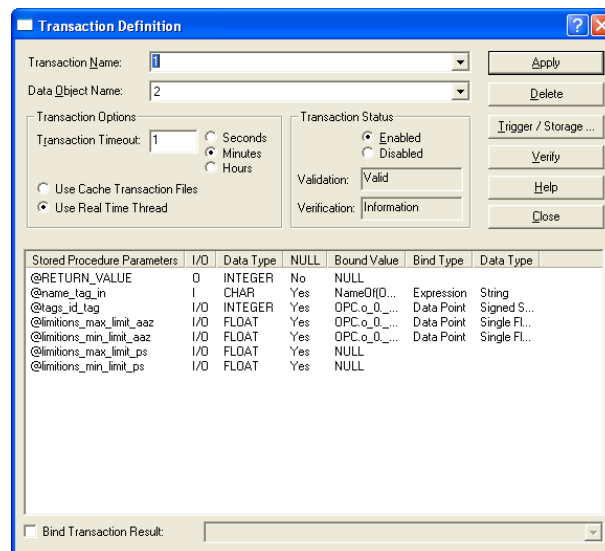


Рисунок 4. Привязка тегов к параметрам хранимых процедур

Количество транзакций в RSSql напрямую зависит от количества информационных каналов. При запущенной конфигурации RSSql для регистрации значений количество транзакций будет варьироваться в пределах 900.

#### СХЕМА ПОСТЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Постэкспериментальная обработка информации – анализ и обработка информации после пуска, с использованием приложений различного типа:

Предлагается использовать приложения следующего типа:

- WEB-приложения.
- Приложения анализа и обработки данных в средах программирования: C++, C#, Delphi.

На рисунке 6 изображена схема постэкспериментального использования базы данных.



Рисунок 6. Схема постэкспериментальной обработки информации

### ВЫВОДЫ

Была разработана модель реляционной базы данных для регистрации экспериментальных данных, хранения метрологических характеристик и пороговых значений предупредительной и аварийной сигнализации, которая позволит эффективно проводить постэкспериментальное использование информации, минимизировать затраты на дисковое пространство. Разработанная модель на этапе разработки прикладного программного обеспечения позволит провести эксперименты по реализации структуры на различных платформах систем управления базами данных. Отработано взаимодействие с эмулятором контроллера

лера - как регистрация различных типов данных, так и загрузка значений в эмулятор. Разработанная модель предоставляет широкий выбор средств постэкспериментальной обработки, представления информации в различных видах, обеспечивает гибкое распределение прав на доступ к информации и обладает мощными средствами резервирования и восстановления данных в результате сбоев. Экспериментальные данные в дальнейшем могут быть интегрированы в любую информационную систему в качестве отдельного интерфейса, что предоставляет огромные возможности для научных исследований и различных этапов предпусковой подготовки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Техническая поддержка Microsoft [Электронный ресурс]. Оценка размера базы данных. Электронная документация по SQL Server 2005 2008 г. – Режим доступа: [http://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/ms187445\(SQL.90\).aspx](http://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/ms187445(SQL.90).aspx) свободный
2. Интернет-университет информационных технологий [Электронный ресурс]. В.И. Грекул, Г.Н Денищенко., Н.Л Коровкина. Проектирование информационных систем. 2008 г – Режим доступа: <http://www.intuit.ru/department/se/devis/10/> свободный
3. К. Дж. Дейт. Введение в системы баз данных./ Дейт. К. Дж. изд. дом «Вильямс» г. Москва, 2001 г.-328 с.
4. Базы данных. Интеллектуальная обработка информации. В. Корнеев [и др.] Нолидж» г. Москва 2000 г. – 225 с.

## ДЕРЕКТЕР БАЗАСЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ИВГ-1М ӨЛШЕУ АРНАЛАРЫНЫҢ ШАМАЛАРЫН ТІРКЕУ ЖҮЙЕСІН МОДЕЛЬДЕУ

Уханов С.В.

Қазақстан Республикасының Ұлттық Ядролық Орталығы, Курчатов

Орындалған жұмыстың нәтижесінде ақпаратты эксперименттен кейін пайдалануды тиімді жүргізуге, дискілік кеңістік шығындарын барынша азайтуға мүмкіндік беретін эксперименттік деректерді тіркеуге, ескерту мен апаттық сигнализацияның метрологиялық сипаттамаларын және шекаралық мәнін сақтауға арналған реляциялық деректер базасы әзірленді. Бұл модель клиент-серверлік архитектуралы СУБД-да іске асырылуы тиіс. Әзірленген модель қолданбалы бағдарламалық қамтамасыз етуді бабына келтіру кезеңінде құрылымды деректер базасын басқару жүйесінің әртүрлі платформаларында іске асыру жөніндегі эксперименттерді жүргізуге мүмкіндік береді. Контроллердің эмулятормен арақатынасы сияқты деректердің

әртүрлі типтерін тіркеу, шамаларды эмуляторға жүктеу пысықталды. Өзірленген модель эксперименттен кейінгі өңдеу, ақпаратты әртүрлі етіп беру құралдарын кеңінен ұсынады, ақпаратқа қатынау құқығын ыңғайлы бөлуді қамтамасыз етеді және жаңылысу салдарынан деректерді резервілеу және қалпына келтірудің қуатты құралдарына ие. Эксперименттік деректер алдағы уақытта кез-келген ақпараттық жүйеге жеке интерфейс ретінде жинақтала алады, бұл ғылыми зерттеулерде және іске қосу алдындағы дайындықтың әртүрлі кезеңдерінде кеңінен пайдалануға мүмкіндік береді.

## DEVELOPMENT OF DATA BASE STRUCTURE AND MODELING OF REGISTRATION SYSTEM FOR IVG-1M MS MEASUREMENT CHANNELS

S.V. Ukhanov

*National Nuclear Centre of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov*

As a result of a work performed, a model of relational data base is designed to register experimental data, store metrological specifications and threshold values of warning and accident alarm. The model will enable to effectively use the data after experiment, minimize expenses for disk space. The model shall be realized in DBMS with client-server architecture. When debugging the application software, the developed model will enable to conduct experiments for the structure realization in different data base management system platforms. Developed is interaction with controller emulator – registration of different data types and load of values into the emulator. The developed model provides a wide variety of tools for post-experimental processing, different data presentation, and provides a flexible distribution of rights for the information, and has effective means to reserve and reconstruct the data as a result of failures. Further the experimental data can be integrated into any information system as a separate interface. This provides possibilities to apply the scientific researches at different stages of pre-startup preparation.

УДК 550.34 УДК 550.34.064

## РЕГИСТРАЦИЯ И ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ МИКРОСЕЙСМ И МИКРОБАРОМ ПО ДАННЫМ СЕТИ СТАНЦИЙ НЯЦ РК

Дубровин В.И., Смирнов А.А.

*Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

Путем совместного анализа длительных непрерывных наблюдений, проведенных инфразвуковой станцией IS31-Актюбинск и сейсмическими группами, установлен источник вторых по представительности инфразвуковых сигналов - микробаромы, генерируемые стоячими волнами во время штормов. Оценены значения азимута прихода этих сигналов на инфразвуковую станцию IS31-Актюбинск ( $285^\circ - 340^\circ$ ). Определена преобладающая частоты этих сигналов (0,14 Гц).

### ВВЕДЕНИЕ

Прошло уже 8 лет с момента ввода в эксплуатацию инфразвуковой группы IS31 Актюбинск на северо-западе Казахстана. Эта станция входит в состав Международной системы мониторинга Организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ОДВЗЯИ). Группа состоит из 8 микробарометров MB2000, ее апертура - 2 км (рисунок 1).

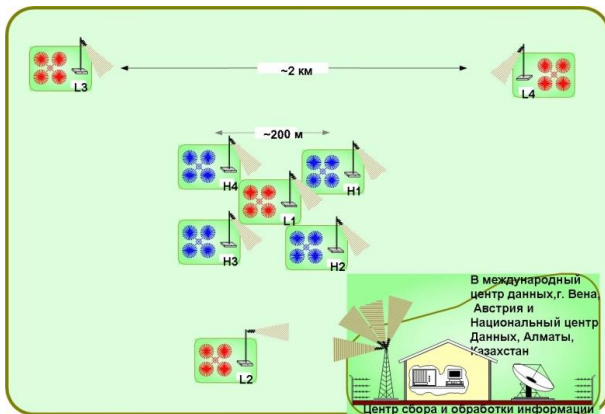


Рисунок 1. Конфигурация инфразвуковой группы IS31 Актюбинск

В непрерывном режиме станция ведет регистрацию инфразвуковых колебаний. Данные по спутниковому каналу в режиме реального времени передаются в Международный центр данных (МЦД) в г. Вена, а затем в казахстанский центр данных (КНЦД) в г. Алматы, где они систематически обрабатываются и анализируются.

### АВТОМАТИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ ПО ИНФРАЗВУКОВЫМ ДАННЫМ

Все данные, регистрируемые станцией изо дня в день, обрабатываются и заносятся в автоматический бюллетень. Сформированный в результате расчетов, бюллетень представляет собой набор строк, расположенных в хронологическом порядке, каждая из которых включает информацию о параметрах события (время, азимут, скорость, частота, амплитуда).

По записям станции в автоматическом режиме производится поиск когерентных (синфазных) сигналов. Алгоритм поиска основан на методе прогрессивной многоканальной корреляции (РМСС) [1].

Главное достоинство метода заключается в выделении посредством поиска взаимной корреляции между записями разных элементов инфразвуковой или сейсмической группы сигналов, регистрируемых не одним, а несколькими ее элементами. Кроме того, метод позволяет выявлять сигналы от постоянно действующих источников. Анализ накопленного материала позволил составить представление об источниках инфразвука, сигналы от которых регистрирует станция. Построение азимутальных гистограмм регистрируемых событий (рисунок 2) показал, что существуют направления, по которым когерентные сигналы приходят регулярно. Так, при изучении, с использованием космоснимков, сигналов с азимутом прихода  $185^\circ - 195^\circ$  было сделано предположение, что источником их является группа газовых факелов месторождения Жанажол. Установка в 2007 году второй инфразвуковой группы (временной) Акбулак и одновременная регистрация сигналов со станцией IS31-Актюбинск позволили однозначно подтвердить высказанное предположение [2].

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ СИГНАЛОВ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО НАПРАВЛЕНИЯ ПО ИНФРАЗВУКОВЫМ И СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

На северо-западе от станции находится источник, второй по представительности детектирований в бюллетенях. Статья посвящена изучению природы этого источника. Ранее [3] было сделано предположение, что, источником сигналов, приходящих из этого сектора, являются микробаромы. В пользу такой гипотезы свидетельствовали длительные перемены в регистрации этих сигналов и высокие кажущиеся скорости прихода.

Микробаромы – это класс атмосферных инфразвуковых волн, генерируемых океаническими штормами [4]. Сейсмический аналог микробаром – микросейсмы. Во время океанических штормов при определенных условиях образуются стоячие волны. Механизм генерации микробаром стоячими волнами показан на рисунке 3. Колебания толщи воды могут быть уподоблены поршню, совершающему возвратно-поступательные движения. Поднимаясь вверх, они образуют микробаромы, вниз — микросейсмы. Колебания, вызванные стоячими волнами, когерентны.



Рисунок 2. Азимутальное распределение детектирований за октябрь 2005 г.

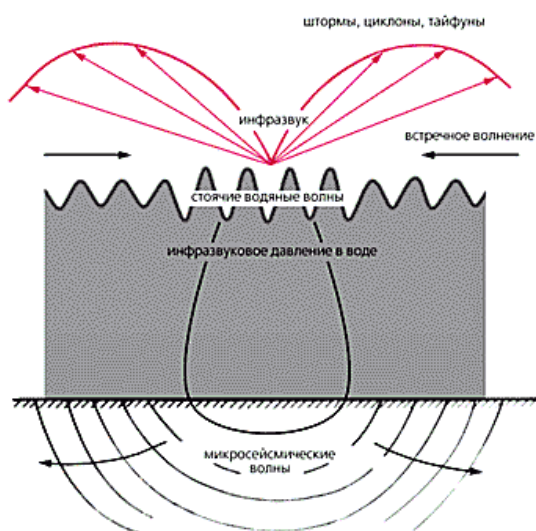


Рисунок 3. Схема образования микросейсм и микробаром [4]

Микросейсм, вызванные стоячими водяными волнами движущихся циклонов, распространяются на большие расстояния. Их записывают все сейсмические станции мира, работающие в непрерывном режиме.

Для того чтобы подтвердить сделанное предположение о природе сигналов, приходящих с северо-запада, были изучены участки записей четырех станций сети НЯЦ РК. Это две сейсмические группы: Акбулак и AS057-Боровое и две инфразвуковые станции: IS31-Актюбинск и временная группа Акбулак. Сейсмическая группа Акбулак состоит из 10 точек наблюдения, расположенных по двум окружностям с одной центральной точкой. На 9 пунктах в скважинах установлены 9 однокомпонентных сейсмометров GS21, кроме того, имеется одна широкополосная трехкомпонентная станция с сейсмометром KS54000 (ABK31). Сейсмическая группа AS057-Боровое имеет аналогичную конфигурацию. Временная инфразвуковая группа Акбулак располагалась на территории сейсмической станции Акбулак. Датчики были установлены на оголовках четырех приборных скважин в точках ABK01 – ABK04,

системы подавления ветровых помех, имеющие диаметр около 7 м были собраны из резиновых шлангов [2]. Наблюдения проведены в период за 21 – 23 октября 2007 года. Данные всех четырех станций были обработаны методом РМСС. Известно [5], что микробаромы и микросейсм имеют характерные периоды около 7 секунд. Поэтому обработка велась в полосе частот от 0,07 до 0,48 Гц.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Результаты расчета азимута прихода сигналов представлены в виде двумерных гистограмм на рисунке 4. Плотность детектирований в зависимости от азимута и времени показана на рисунке в цвете.

Из рисунка 4 видно, что существуют направления, по которым регулярно приходят сигналы с периодами, характерными для микросейсм и микробаром. Сейсмическая группа Акбулак четко зафиксировала одно такое направление, имеющее азимут около 340°. Для сейсмической группы AS057-Боровое таких направлений уже не менее двух (следует отметить также недлинный максимум на гистограмме с азимутом около 120° 21 октября). Наибольшее количество различных направлений, по которым регулярно приходят сигналы, выделяется на гистограмме, построенной для станции IS31-Актюбинск. На гистограмме, построенной для временной инфразвуковой группы Акбулак таких направлений только два. Все станции, данные которых использованы в работе, находятся достаточно далеко от предполагаемых источников, поэтому логично предположить, что азимуты на эти источники для разных станций должны быть близки. В этой связи выделены несколько диапазонов азимутов, где все или большинство станций детектировали сигналы одновременно. Во-первых, это участок с азимутами близкими к 340°. Гистограммы по станциям Акбулак и IS31-Актюбинск показывают, что плотность детектирований в этой полосе значений на всех гистограммах возрастает с середины дня 22 октября.



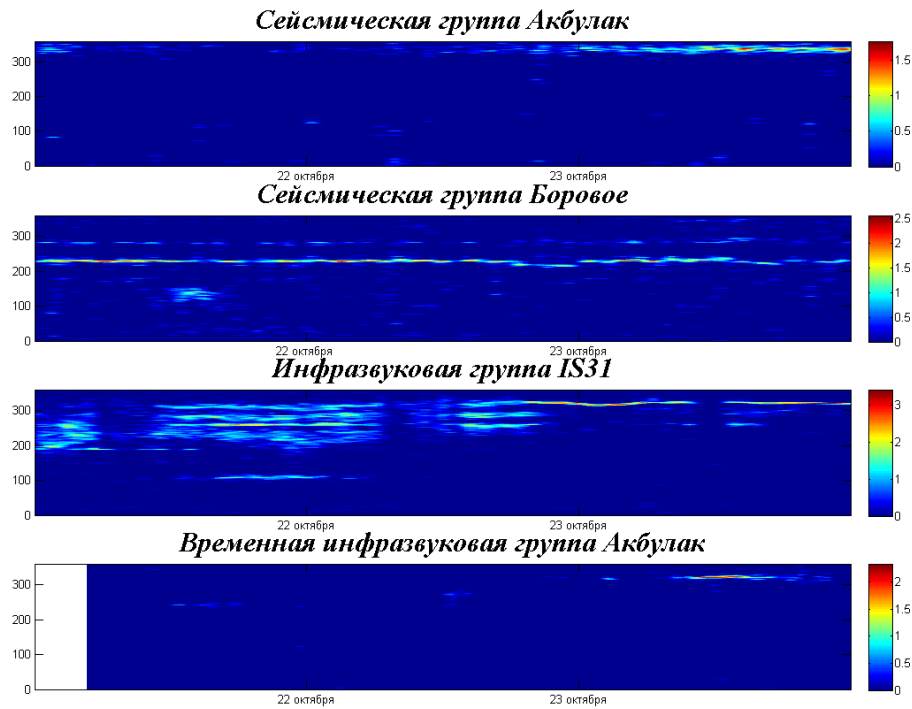


Рисунок 4. Двумерные гистограммы количества детектирований в зависимости от азимута и времени прихода сигнала

В это же время отдельные детектирования в этом диапазоне азимутов проявляются в записях станции AS057-Боровое. Сходство поведения и близость значения азимутов на этом участке дают основания полагать, что зарегистрированные скопления детектирований соответствуют одному и тому же источнику. Низкая частота, большая длительность и сам факт, что источник генерирует как сейсмические, так и инфразвуковые сигналы, позволяет с большой степенью вероятности считать, что эти станции сети НЯЦ РК в данном случае регистрируют микросейсм и микробаромы. В диапазоне азимутов  $100^\circ - 130^\circ$  все другие станции НЯЦ РК также имеют хотя бы одиночные детектирования. Для того чтобы определить азимуты на источники, а затем локализовать их, для всех четырех станций были построены гистограммы азимутального распределения детектирований (рисунок 5).

Для локализации источников были использованы азимуты только от сейсмических станций. Для точной локализации по инфразвуковым данным необходимо определить и ввести поправки за ветровой снос в верхних слоях атмосферы, что представляется задачей для будущих исследований. Азимуты на источники от двух сейсмических групп и координаты, определенные по ним, приведены в таблице 1.

Взаимное расположение станций и результаты локализации источников сигналов показаны на рисунке 6.

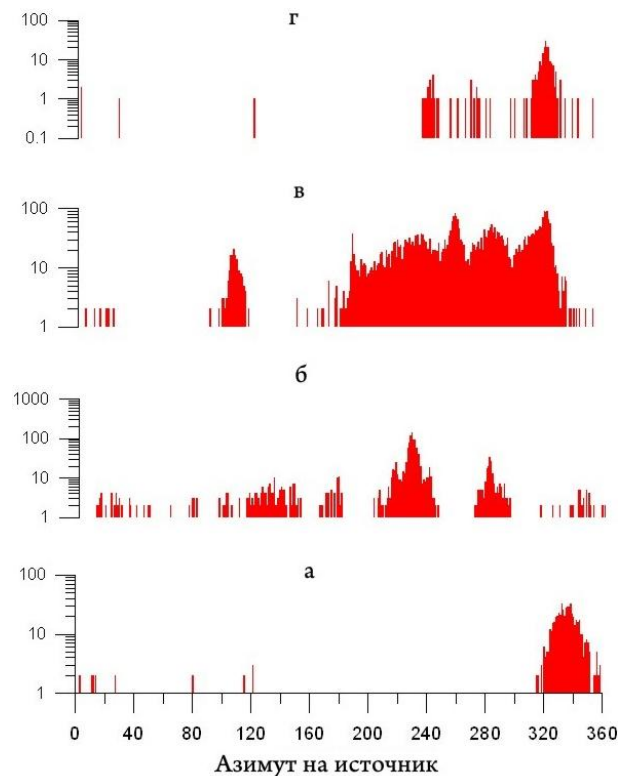
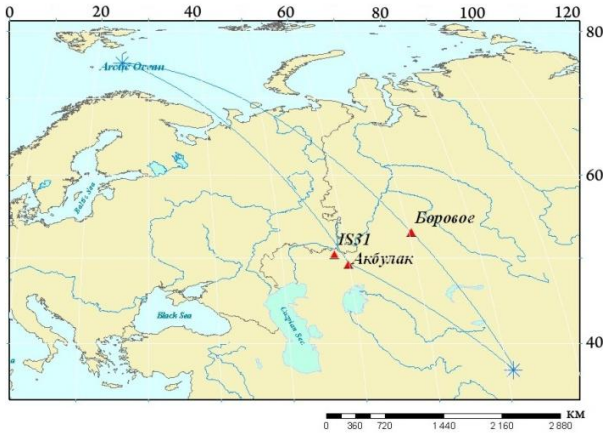


Рисунок 5. Гистограммы азимутального распределения детектирований по данным сейсмических групп: а – Акбулак, б – AS057-Боровое, и инфразвуковых групп: в – IS31-Актюбинск, г – Акбулак (временная)



Таблица 1. Результаты локализации мест генерации микросейсм и микробаром

Выделенное направление	Сейсмическая группа	Азимут на источник	Координаты источника	Район
1	Акбулак	340° С.Ш	75° С.Ш.	Баренцево море
	AS057-Боровое	340° В.Д.	25° В.Д.	
2	Акбулак	120° С.Ш	370° С.Ш.	Озеро Иссык-Куль
	AS057-Боровое	150° В.Д.	81° В.Д.	



\* - эпицентры; ▲ - станции

Рисунок 6. Расположение станций Акбулак, AS057-Боровое и IS31-Актюбинск и мест генерации микросейсм и микробаром, локализованные по их данным

Сигналы от микробаром и микросейсм, генерируемые в Баренцевом море и на озере Иссык-Куль, были зарегистрированы 21 - 23 октября станциями Акбулак и AS057-Боровое (рисунок 4). Некоторое несходство картин регистрации микросейсм и микробаром на гистограммах можно объяснить двумя причинами. 22 октября повысилась плотность детектированных микробаром из Баренцева моря на гистограмме, полученной на IS31-Актюбинск, что, по-видимому, вызвано увеличением интенсивности шторма. Детектирование микробаром с других направлений полностью прекратилось или значительно сократилось. Таким образом, регистрация интенсивных микросейсм или микробаром с одного направления может подавлять регистрацию с других направлений, как это произошло, например, на сейсмической станции Акбулак. Второй причиной может быть различная чувствительность станций. Яркой иллюстрацией этого может быть различие гистограмм инфразвуковых детектирований по станциям IS31-Актюбинск и Акбулак. Станции располагались не далее 200 км друг от друга. Было бы естественным ожидать большого сходства картин регистрации микробаром. Однако группы имели разное количество элементов: 8 - на IS31-Актюбинск и 4 - на станции Акбулак. Системы подавления ветровых помех на станции IS31-Актюбинск - более эффективные. В результате чувствительность IS31-Актюбинск выше, что позволило ей работать намного эффективнее.

Как уже говорилось ранее, задачей будущих исследований для инфразвуковых станций является расчет поправок за ветровой снос. Это позволит использовать инфразвуковые станции для локализации далеких событий. По использованному данным инфразвуковой станции IS31-Актюбинск и сейсмической группы AS057-Боровое это позволило бы локализовать еще как минимум два места генерации микросейсм и микробаром.

Изучение частотных характеристик сигналов, приходящих по различным направлениям, еще более ясно показало, что искомый сигнал характеризуется низкими частотами ( $\approx 0,14$  Гц), совпадающими с периодами океанических микросейсм регистрируемых сейсмическими станциями (рисунок 7).

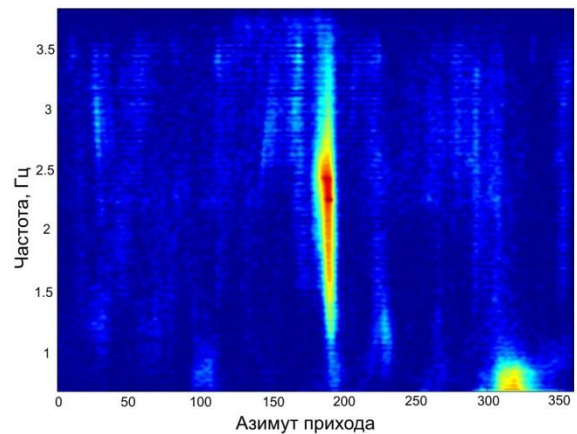


Рисунок 7. Частотная характеристика сигналов с различными азимутами прихода по инфразвуковой станции IS31-Актюбинск (2007 год)

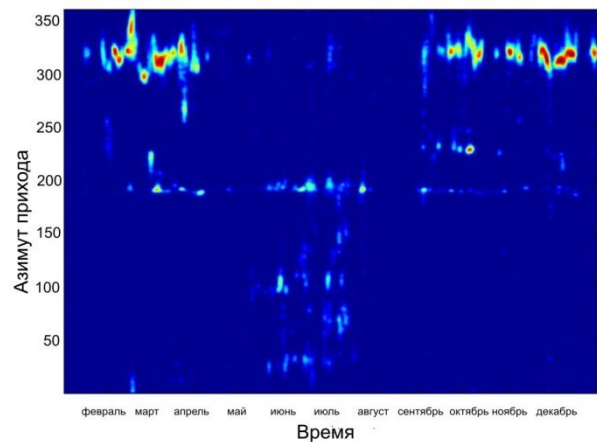


Рисунок 8. Временные вариации азимута прихода сигналов на инфразвуковую станцию IS31-Актюбинск

Построенные временные вариации азимута прихода низкочастотных сигналов за весь год, показали, что в инфразвуковых записях микробаром есть перемены, составляющие почти полгода (рисунок 8). Однако на сейсмических станциях регистрация микросейсм продолжалась. Объяснением этого факта может быть отсутствие отражающих горизонтов в атмосфере в этот период года, что не позволяет вести регистрацию сигналов на больших расстояниях.

На рисунке 9 в качестве итога показаны основные направления прихода низкочастотных инфразвуковых сигналов, установленные в результате проведенного анализа.

Как видно, северо-западное направление не является единственным. Аналогичные сигналы приходят также со стороны Каспийского моря и озера Иссык-Куль.

Таким образом, в результате совместного анализа инфразвуковых и сейсмических данных, регистрируемых инфразвуковыми и сейсмическими станциями в Западном Казахстане, установлен источник вторых по представительности инфразвуковых сигналов. Этими сигналами являются микробаромы, генерируемые стоячими волнами во время штормов. Микробаромы характеризуются преобладающими частотами примерно 0,14 Гц и азимутом прихода

340 градусов. Существуют периоды времени (весна - лето), когда регистрация этих сигналов на инфразвуковой станции прекращается в силу отсутствия в атмосфере отражающих горизонтов.

Разработанные методические подходы позволяют распознавать микробаромы среди тысяч других сигналов, вносимых в инфразвуковые автоматические бюллетени, и выделить их в отдельный класс событий при решении задач ядерного мониторинга.

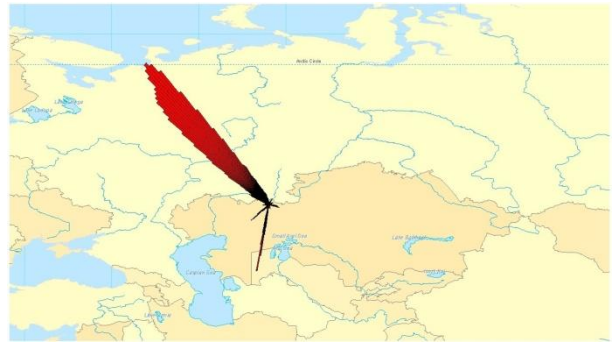


Рисунок 9. Основные направления прихода низкочастотных сигналов на инфразвуковую станцию IS31-Актюбинск

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Cansi, Y. An automatic seismic event processing for detection and location: The P.M.C.C. method / Y. Cansi //, Geophysical research letters. - 1995. - Vol. 22, N 9. - P. 1021 - 1024.
2. Smirnov, A. Preliminary Results of Localization and Characterization of Steady Infrasound Source as Detected by I31KZ / A. Smirnov [et al] // Infrasound Technology Workshop, Tokyo, Japan, 13 - 16 November 2007.
3. Дубровин, В. И. Идентификация источников инфразвуковых сигналов / В.И. Дубровин, А.А. Смирнов // Вестник НЯЦ РК, 2008. - вып. 3. - С. 85 - 89.
4. Табулевич, В.Н. Влияние штормовых вибраций на землетрясения / В.Н. Табулевич, Е.Н. Черных, Н.Н. Дреннова // Природа. - М.: Наука, 2002. - № 10. - С. 12 - 16.
5. Аки, К Количественная сейсмология / К. Аки, П. Ричардс. / М.: Наука, 1983. - С. 495.

### ҚР ҰЯО СТАНЦИЯЛАР ЖЕЛІСІНІҢ ДЕРЕТЕРІ БОЙЫНША МИКРОСЕЙСМОЛАР МЕН МИКРОБАРОМДАРДЫ ТІРКЕУ ЖӘНЕ ПАРАМЕТРЛЕУ

Дубровин В.И., Смирнов А.А.

*ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Қурчатов, Қазақстан*

IS31-Ақтөбе және сейсмикалық топтары арқылы жүргізілген ұзақ үздіксіз бақылауларын бірлескен талдау жолымен сенімділігі бойынша екінші болатын инфразвукты сигналдардың көзі анықталған – теңіз дауылы кезінде тік толқындар өндіретін микробаромдар. Сол сигналдар IS31-Ақтөбе станциясына келетін азимуттары бағаланған (285° – 340°). Сол сигналдардың басым жиіліктері анықталған (0,14 Гц).

**RECORDING AND PARAMETRIZATION OF MICROSEISM  
AND MICROBAROMS USING DATA OF NNC RK MONITORING NETWORK**

**V.I. Dubrovin, A.A. Smirnov**

*Institute of Geophysical Researches NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

According to data of continuous observations at IS31-Aktyubinsk infrasound station and seismic arrays the source of infrasound signals having the second class of representatively – microbaroms - was defined as a result of joint analysis. These signals were generated by standing waves during storms. Azimuths of the signals arrival at the infrasound station (285° – 340°) were evaluated. Dominant frequencies of these signals (0.14 Hz) were determined.

УДК 550.34

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА ПО ДАННЫМ СТАНЦИЙ НЯЦ РК

Захарова О.В., Комаров И.И.

*Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

На всех станциях сети НЯЦ РК в различных условиях (шахта, скважина, поверхность) установлены широкополосные трехкомпонентные сейсмометры. По результатам регистрации ими сейсмических волн исследованы спектральные характеристики шума отдельно для вертикальной и горизонтальных компонент. Получены модели шума, которые тяготеют к нижнему уровню мировой модели шума Петерсона. Установлено, что все станции сети НЯЦ РК, за исключением станции, установленной в центре данных (KNDC), имеют достаточно низкий уровень шума и обладают высокими мониторинговыми возможностями.

**ВВЕДЕНИЕ**

На территории Казахстана функционирует новая сеть цифровых сейсмических станций Национального ядерного центра РК, предназначенная для слежения за ядерными испытаниями на зарубежных территориях. Данная сеть используется также для регистрации землетрясений и промышленных взрывов на территории республики и в прилегающих к ней областях (Россия, Китай, Кыргызстан и т.д.). Охват мониторингом большой площади связан с расположением станций по всей территории Казахстана (рисунок 1). Данные всей сети станций НЯЦ РК поступают в Казахский национальный центр данных (KNDC), где и происходит их обработка.

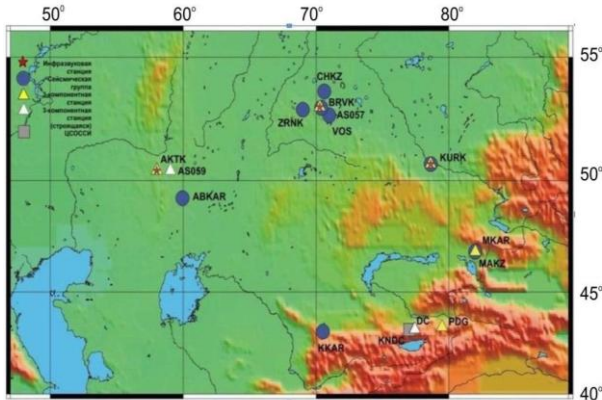


Рисунок 1. Сеть станций Национального ядерного центра Республики Казахстан

Важнейшей характеристикой и показателем эффективности работы каждой из станций является спектральная характеристика ее сейсмических шумов. Эта характеристика дает возможность оценить качество записей событий, чувствительность станции, а также возможность следить за исправностью работы сейсмометров. Существующие мировые модели шума справедливы для всех сейсмических станций мира: две спектральные кривые NHHM (New High-Noise Model) и NLNM (New Low-Noise Model) являются пределом (ограничением) допустимых значений шума (рисунок 2). В статье приведены результаты анализа динамических характеристик сейсмического шума для каждой станции НЯЦ РК, рассмотрены их вариации, а также проведено сравнение параметров шума для разных станций между собой.

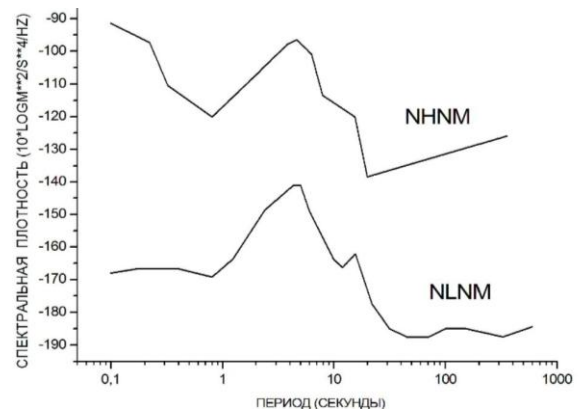


Рисунок 2. Мировая спектральная модель сейсмического шума: NLNM (нижне-) и NHHM (верхне-уровневая)

**ОЦЕНКА СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЙСМИЧЕСКИХ ШУМОВ ДЛЯ СТАНЦИЙ**

Использованы сейсмические записи станций НЯЦ РК за 2005 - 2007 гг. Для получения спектральных моделей шума применена разработанная ранее методика [1]. По каждой станции создавались выборки отрезков сейсмических записей длиной по 10 мин. В каждую выборку входило не менее 100 отрезков записей. Отдельно группировались и изучались записи дневного и ночного шума. Дневным периодом считалось местное время от 7 до 19 ч, ночным – от 19 до 7 ч. В таблице 1 приведена информация о 8 станциях, данные которых были использованы в проведенных исследованиях.

По результатам расчетов, проведенных по каждой горизонтальной компоненте для дня и ночи, были получены наборы спектральных кривых сейсмического шума в диапазоне периодов от 0,05 до 100 с. В качестве параметров, характеризующих распределения, использованы медиана и перцентили. Медианные спектральные кривые являются наиболее вероятными характеристиками сейсмического шума станции. Также построены собственные спектральные модели шума для каждой станции. На рисунке 3 в качестве примера приведены результаты оценки параметров шумов для одной из горизонтальных компонент (N-S) по дневным отрезкам записей, выполненных станцией AS058-Курчатов.



Таблица 1. Характеристика сейсмометров станций НЯЦ РК

Код Станции	Название станции	Тип сейсмометра	Частотный диапазон, Гц	Место установки
CHK	Чкалово	STS-2	0.008 - 45	Шахта
MKAR (PS23)	Маканчи	KS54000	0.003 - 16	Скважина
KKAR	Каратау	KS54000	0.003 - 16	Скважина
ABKAR	Акбулак	KS54000	0.003 - 16	Скважина
BVAR- AS057	Боровое	CMG -3TB	0.008 - 50	Скважина
AKTO-AS059	Актюбинск	CMG -3TB	0.008 - 50	Скважина
KURK_AR-AS058	Курчатов	CMG -3TB	0.008 - 50	Скважина
KNDC	Алматы	STS-2	0,008 - 40	Бункер

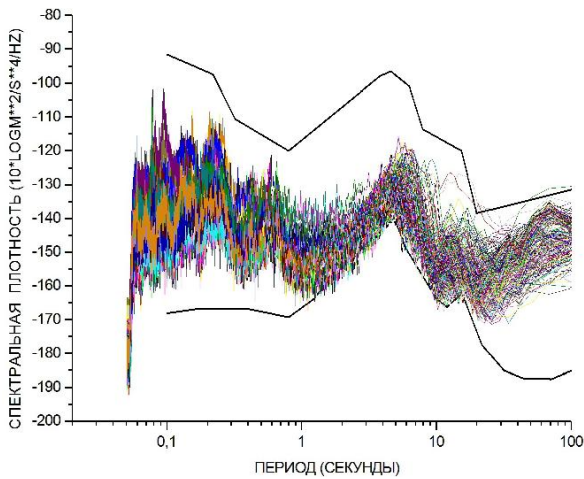


Рисунок 3. Спектральные кривые сейсмического шума. Станция AS058-Курчатов. Дневное время. Горизонтальная компонента (N-S)

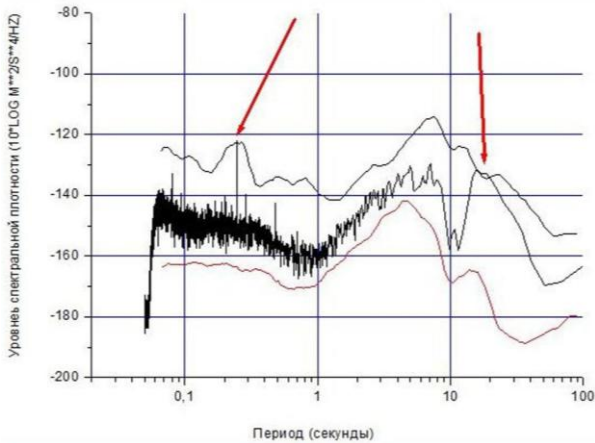


Рисунок 4. Пример модели сейсмического шума с отдельными значительными отклонениями от нормальных значений уровня шума

Разброс данных, относящихся к разным дням наблюдений, связан с естественными вариациями сейсмического шума, на который влияют самые различные факторы: сезон года, метеорологические условия, промышленные шумы и др.

#### МЕТОД ОТБОРА НЕКАЧЕСТВЕННЫХ ЗАПИСЕЙ

Полученные по всем станциям модели шума были занесены в специальную таблицу в формате Excel. Для проверки построенных моделей шума создано приложение в Excel, которое позволяло просматривать новые данные или данные, не вошедшие в выборку, использованную при построении модели шума, с целью выявления возможного отклонения уровня шума от модели. Алгоритм программы построен таким образом, что программа выявляет не одиночные, а групповые случайные отклонения от модели, что свидетельствует о неисправностях в работе оборудования или о наличии каких-либо внешних факторов, повлиявших на типичную спектральную картину шума станции. На рисунке 4 показан пример работы программы, выявившей два заметных отклонения записи относительно модели шума, на которые следует обращать особое внимание и выяснять их происхождение. Помимо неисправностей, это могут быть сильные землетрясения или новые источники шума в районе расположения станции.

Таким образом, разработан инструмент, который позволяет интерактивно проверять уровни шума каждой станции относительно построенной модели, что позволяет оперативно оценивать качество сейсмических данных. На рисунке 5 приведен пример выявления технических неполадок на станции AS057-Боровое. Видно, как, начиная с определенного времени, изменились спектральные кривые шума: они резко отклонились от модельной кривой и даже вышли за пределы нижнего предела модели шума. Оперативная проверка аппаратуры на станции подтвердила возникшие проблемы в ее работе.

Наборы спектральных кривых шумов получены для каждой станции сети НЯЦ РК. Во всех случаях, как и в примере станции AS058-Курчатов (рисунок 3), спектральные кривые хорошо укладываются между верхне- и нижеуровневой мировой моделями сейсмического шума.

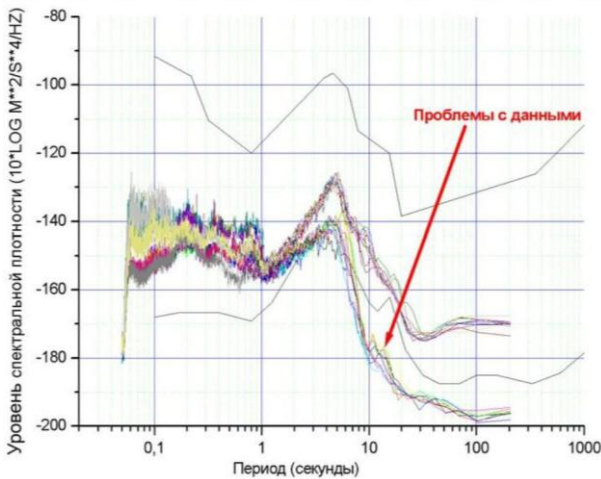


Рисунок 5. Выявление по спектральным кривым сейсмических шумов неполадок в аппаратуре по станции AS057-Боровое

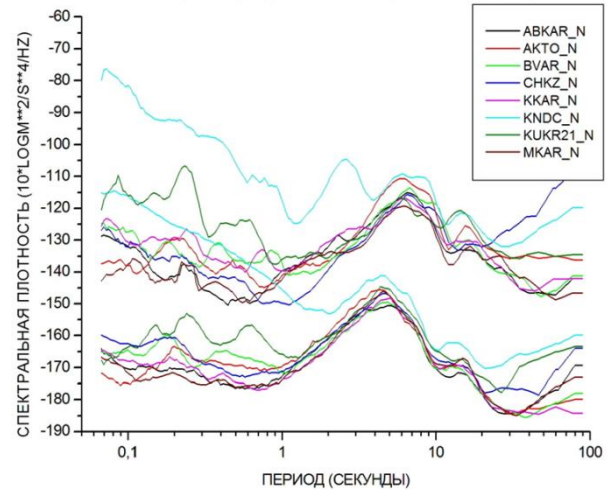


Рисунок 7. Модели шума, построенные для 8 станций НЯЦ РК

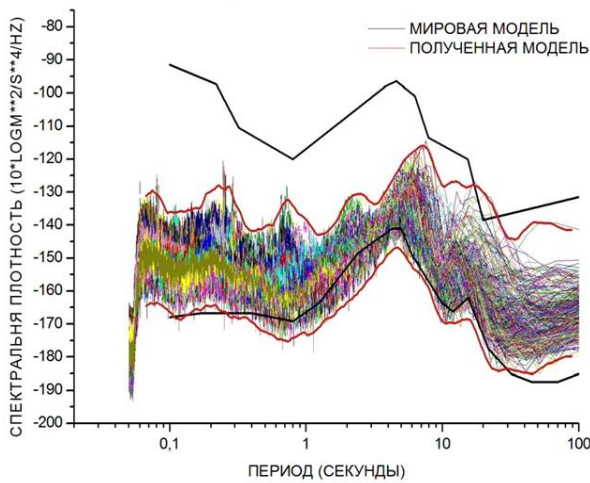


Рисунок 6. Спектральная модель шума (красные линии) Станция Каратау. Дневное время. Компонента (N-S)

#### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

После отбора и удаления некачественных данных были построены модели шума для всех станций НЯЦ РК. На рисунке 6 показана такая рассчитанная модель для станции Каратау, относящаяся к дневному промежутку времени и к горизонтальной компоненте (N-S). Из рисунка 6 видно, что станция является «малошумной», поскольку построенная модель тяготеет к нижнеуровневой границе мировой модели шума.

Проведено сравнение полученных моделей шума для всех станций между собой (рисунок 7), которое показало, что станции НЯЦ РК, за исключением станции KNDC, характеризуются относительно низкими значениями шума и обеспечивают сейсмологов качественными данными. По уровню шума станции можно разделить на две основные группы: установленные на рыхлых и на коренных породах.

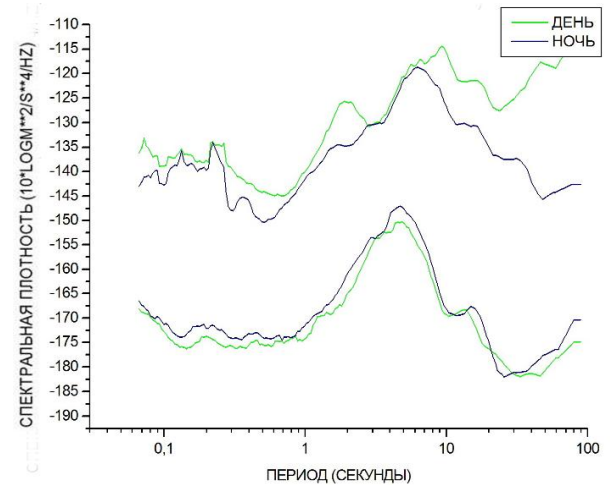


Рисунок 8. Модели шума для дневного и ночного времени. Станция PS23-Маканчи. Компонента (E-W)

Станции, установленные на рыхлых грунтах являются относительно «шумными» (как, например, станция KNDC). Модели, построенные для станций, установленных на коренных породах, имеют сходный характер и довольно хорошо соответствуют мировой модели. Но все же при общности построенных моделей, в них есть локальные различия, что говорит о том, что станции расположены в различных сейсмических условиях и имеют в окрестностях разные источники промышленного шума.

Наблюдается различие уровня шума для дневных и ночных промежутков времени, особенно в высокочастотной области (рисунок 8), связанное с активной деятельностью человека. Однако суточные вариации шума являются умеренными. Кроме того, известно, что для сейсмических данных наиболее важным является диапазон частот вблизи 1 Герца, а из рисунков 3 – 8 видно, что в этой области наблюдаются низкие значения уровня шума как в дневное, так и в ночное время. Тем самым еще раз подтвер-



ждается, что сейсмические станции сети НЯЦ РК имеют высокую чувствительность.

Проведен анализ моделей по трем компонентам для каждой станции. Установлено, что они имеют сходный характер, но в длиннопериодной области отмечается более низкий уровень сейсмического шума на вертикальной компоненте по сравнению с горизонтальными (рисунок 9).

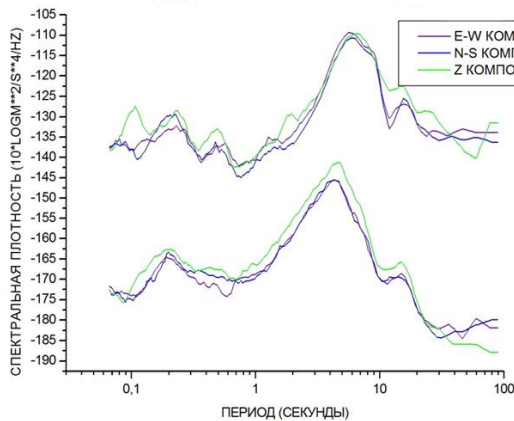


Рисунок 9. Модели шума для ночного времени. Три компоненты. Станция АКТО-АС059

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлова, Н.Н. Спектральные характеристики сейсмического шума по данным Казахстанских станций мониторинга / Н.Н. Михайлова, И.И. Комаров // Вестник НЯЦ РК. - 2006 – Вып. 2. – С. 19 – 26.
2. Peterson, J. Observation and Modeling of Seismic Background Noise / J. Peterson // Open-File Report 93-322. Albuquerque. - New Mexico. - 1993. - 42 p.

## ҚР ҰЯО СТАНЦИЯЛАРЫ БОЙЫНША СЕЙСМИКАЛЫҚ ШУДЫҢ СПЕКТРЛІК СИПАТТАМАСЫ

Захарова О.В., Комаров И.И.

*ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

ҚР ҰЯО желісінің барлық станцияларында әр түрлі жағдайларында (шахта, ұңғыма, жер беті) кең жолақы үш компонентті сейсмометрлер орнатылған. Олар сейсмикалық толқындарын тіркеу нәтижелері бойынша, вертикаль және горизонталь компоненттеріне бөлек шудың спектрлік сипаттамалары зерттелген. Петерсон аталатын шудың дүниежүзілік моделінің төменгі деңгейіне тартылатын модельдері алынған. ҚР ҰЯО желісінің барлық станцияларының, деректер орталығында орнатылғанын станцияны (KNDC) қоспағанда, шудың жеткілікті төмен деңгейі бар да жоғары мониторингтік мүмкіндігі бар.

## THE NOISE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF NNC STATIONS

O.V. Zakharova, I.I. Komarov

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

Three-component broadband seismometers (BB) were installed at all seismic stations of the NNC (National Nuclear Center). The seismometer vault types were different (shaft, borehole, surface). The spectral characteristics of noise were investigated for vertical and horizontal components. The received models incline to the new low-noise model (NLNM) of Peterson. The comparative analysis of the models was made. It was found that all NNC stations, except for KNDC, had low level of noise and possessed high monitoring abilities.

УДК 502.55:621.039.7

## К ВОПРОСУ УЧЕТА ТЕХНОГЕННЫХ РАДИАЦИОННЫХ РИСКОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Артёмов В.А., Кабдрахимова Г.Д., Полешко А.Н.

*Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан*

Проведено обоснование нормативов допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферу от объектов Института ядерной физики НЯЦ РК: реактора ВВР-К и корпуса радиохимических лабораторий, при которых дозовые нагрузки на персонал и население не превышают пределы, регламентируемые НРБ-99. Рассчитаны дозы внешнего облучения от радиоактивных выбросов. Получены карты зонирования территории по степени и характеру негативного воздействия по пакету прикладных программ «Эколог» v3.0.

### ВВЕДЕНИЕ

Годы независимости в Казахстане стали годами образования и становления совершенно новой системы управления окружающей среды и природопользования. Основы государственной политики в области охраны окружающей среды были заложены в Концепции экологической безопасности, основными направлениями которой является экологизация экономики, законодательства и общества.

С момента принятия данной Концепции оценка воздействия на окружающую среду является обязательной для любых видов хозяйственной и иной деятельности, которые могут оказать прямое или косвенное воздействие на окружающую среду и здоровье населения. На основании этой обязательной оценки осуществляется разрешение на загрязнение окружающей среды.

Для планирования и ведения воздухоохраных работ на предприятии необходимо устанавливать предельно-допустимые выбросы веществ в атмосферу. Согласно нормативной документации все расчеты проводятся с помощью программ автоматизированного расчета загрязнения атмосферы.

Все имеющиеся на казахстанском рынке автоматизированные программы предназначены для определения химического загрязнения, что затрудняет реализацию расчета распределения радиоактивных выбросов.

### ХАРАКТЕРИСТИКА ПРЕДПРИЯТИЯ КАК ИСТОЧНИКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

Источниками радиоактивного загрязнения атмосферы ИЯФ являются исследовательский реактор типа ВВР-К, корпус радиохимических лабораторий и пункт захоронения радиоактивных отходов.

Исследовательский ядерный реактор типа ВВР-К, физический пуск которого осуществлён в 1967 г.,

позволяет проводить фундаментальные и прикладные исследования в интересах науки и народного хозяйства Республики Казахстан.

Здание реактора оборудовано приточно-вытяжной вентиляцией с механическим и естественным побуждением. Вытяжная вентиляция по своему назначению подразделяется на специальную и общеобменную.

Выбросы реактора подразделяются на 2 группы: газовые выбросы и аэрозольные ультрадисперсные.

Во всех помещениях здания РХК имеется приточно-вытяжная вентиляция с механическим побуждением. Вытяжная вентиляция по своему назначению подразделяется на общеобменную и местную.

Вентиляция могильника включается только при вскрытии полостей при загрузке отходов (не более 10 часов в месяц). Поэтому выброс радиоактивных аэрозолей через вентиляционную трубу могильника, по данным СРБ составляет менее  $1 \cdot 10^{-12}$  Ки/сутки, или  $3,65 \cdot 10^{-10}$  Ки/год, что обуславливает ничтожную величину дозовых нагрузок даже в критической точке, и при расчётах ПДВ не учитывается.

Характеристики источников и фактические количества выбросов приведены в таблице 1.

### РАСЧЁТ ДОПУСТИМЫХ ОБЪЕМНЫХ АКТИВНОСТЕЙ (ДОА) РАДИОНУКЛИДОВ В ВОЗДУХЕ ДЛЯ ВСЕХ ПУТЕЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Исходя из состава выбрасываемых нуклидов, расчёт ДК проведён по группам нуклидов в зависимости от характера формирования дозовых нагрузок. При этом выделены следующие группы:

1. Инертные короткоживущие радиоактивные газы;
2. Долгоживущие радионуклиды.

Таблица 1. Выбросы реактора, РХК и могильника

Источник	Высота источ. Выбросов, м	Диаметр устья трубы, м	Объем ГВС, м <sup>3</sup> /с	Выброс ГБк/год
Реактор	82	1,2	23,6	4400-11100
РХК	36	2,4	18,8	$1,76 \cdot 10^{-2}$
Могильник	33	0,2	0,015	$1,35 \cdot 10^{-8}$

**К ВОПРОСУ УЧЕТА ТЕХНОГЕННЫХ РАДИАЦИОННЫХ РИСКОВ  
ПРИ ОЦЕНКЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**

Для первой группы характерно формирование дозовых нагрузок только по внешнему облучению с учетом ингаляционного пути, поэтому дозовый фактор принимается из таблицы П5-3 ДВ-98. Для короткоживущих радиоактивных газов доза по прямым путям облучения определяется формулой приложения П5-2 ДВ-98. На основе этой формулы ДОА для дозы 1 мЗв:

$$ДК = 0,001 / R_A^* \cdot 0,4 \cdot 3,15 \cdot 10^7$$

где  $R_A^*$  - Дозовый фактор конверсии, Зв·м<sup>3</sup>/Бк·с.

Для второй группы дозовый фактор принимается по НРБ-99. Монофакторные ДОА<sub>п</sub> по пищевым цепям для долгоживущих радионуклидов, кроме трития, определены на основе ДО по формуле:

$$ДОА_{п} = ДО_{п} / V_g + \Delta \cdot H_z \cdot 3,15 \cdot 10^7$$

где  $V_g = 0,008$  - эффективная скорость сухого осаждения радионуклидов на почву, м/сек,  $\Delta \cdot H_z$  - эффективная скорость "мокрого" (во время выпадения осадков) осаждения радионуклидов на почву, м/сек.

ДОА<sub>и</sub> трития (<sup>3</sup>H) при ингаляции согласно НРБ-99 равна 1900 Бк/м<sup>3</sup>. ДОА<sub>и</sub> трития от поступления по пищевым цепям определена с использованием методики, изложенной в справочнике Н.Г.Гусева. По соотношению  $1 / ДОА = \sum 1 / ДОА_i$  ДОА трития равна 670 Бк/м<sup>3</sup>.

**РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ВЫБРОСОВ**

Расчеты выбросов вредных веществ в атмосферу производились на основании нормативной базы РК по экологии и радиационной безопасности и отчетов отдела радиационной безопасности ДПП ИЯФ НЯЦ РК за 2003-2007гг.

В связи с введением в действие НРБ-99 и отменой действовавших в соответствии с НРБ-72/87 дозовых пределов на критические органы отпадает необходимость в определении доз на эти органы и возможно установление ДВ согласно принятой в НРБ-99 методике оценке дозы как суммы монофакторных воздействий от каждого радионуклида и каждого источника выбросов. Алгоритм расчетов приведен в ПДВ-83.

При новом нормативе в величинах эффективной дозы расчет ПДВ радионуклидов заключается в уста-

новлении зависимости между мощностью выброса источника и величиной эффективной дозы в критической точке местности от всех вытекающих факторов радиационного воздействия (внешнее проникающее излучение, ингаляция, поступление через пищу). Эти величины можно определить (связать) через один параметр – наибольшую допустимую среднегодовую объемную активность радионуклида на местности (на границе санитарной зоны) с учетом всех факторов радиационного воздействия и установить мощность выброса (ПДВ<sub>и</sub> и ДВ<sub>и</sub>) *i*-го радионуклида, обуславливающую годовую эффективную дозу менее допустимой 1 мЗв в год от данного источника выбросов. В случае выброса *В<sub>i</sub>* смеси радионуклидов должно обеспечиваться условие  $\sum V_i / ПДВ_i < \gamma$ . В случае выброса из *j* источников должно обеспечиваться условие:  $\sum \sum V_{ij} / ПДВ_{ij} < \gamma$

Исходной формулой для определения предельно допустимого выброса радионуклида является формула:

$$ПДВ = 3,15 \cdot 10^{10} Kp^{эпу} \cdot ДК_{н}$$

где ПДВ – предельно допустимый выброс, Ки/год;  $ДК_{н}$  – допустимая объемная активность радионуклида для населения с учетом всех факторов радиационного воздействия, Ки/л;  $Kp_{гру}$  – коэффициент разбавления примеси в приземном слое атмосферы при реальной скорости ветра, м<sup>3</sup>/с (рассчитывается согласно ПДВ-83)

В современном представлении (заменяя Ки на Бк и в  $ДК_{н}$  (ДОА) л на м<sup>3</sup>), получим:

$$ДВ_i = 3,15E + 7 \cdot Kp^{эпу} \cdot ДОА / 3$$

где ДВ<sub>и</sub> – допустимый выброс, Бк/год;

ДОА – допустимая объемная активность радионуклида для населения с учетом всех факторов радиационного воздействия, Бк/м<sup>3</sup>; 3 – коэффициент запаса по п. 1.2.8 ПДВ-83.

Расчитанные значения Допустимых Выбросов ДВ<sub>и</sub>, при условии выброса одного радионуклида из одного источника выбросов радиоактивных веществ в атмосферу сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Предельно-допустимые выбросы реактора и РХК

Выбросы реактора				Выбросы РХК			
Радио нуклид	ДОА	ДВ <sub>и</sub> , Бк/год	ДВ <sub>и</sub> , Ки/год	Радио нуклид	ДОА	ДВ <sub>и</sub> , Бк/год	ДВ <sub>и</sub> , Ки/год
<sup>41</sup> Ag	915	1,66E+16	4,49E+05	<sup>51</sup> Cr	1,10E+06	2,2E+14	5934
<sup>87</sup> Kr	1515	2,75E+16	7,43E+05	<sup>60</sup> Co	362	7,2E+10	1,96
<sup>88</sup> Kr	571	1,04E+16	2,80E+05	<sup>65</sup> Zn	703	1,4E+11	3,80
<sup>133</sup> Xe	24500	4,44E+17	1,20E+07	<sup>90</sup> Sr	49	9,7E+09	0,26
<sup>135</sup> Xe	4810	8,73E+16	2,36E+06	<sup>131</sup> I	4257	8,5E+11	23
<sup>3</sup> H	670	1,22E+16	3,29E+05	<sup>134</sup> Cs	111	2,2E+10	0,60
<sup>51</sup> Cr	80,4	1,46E+15	39400	<sup>137</sup> Cs	86	1,7E+10	0,46
<sup>60</sup> Co	2,6E-02	4,81E+11	13	<sup>57</sup> Co	1,7E+04	3,4E+12	92
<sup>65</sup> Zn	5,1E-02	9,34E+11	25,3	<sup>64</sup> Cu	4,7E+04	9,3E+12	252
<sup>90</sup> Sr	3,5E-03	6,45E+10	1,7	<sup>99</sup> Mo	7,0E+05	1,4E+14	3791
<sup>131</sup> I	0,31	5,66E+12	153	<sup>201</sup> Tl	4,6E+06	9,3E+14	25000
<sup>134</sup> Cs	8,1E-03	1,48E+11	4	<sup>201</sup> Pb	4,5E+06	9E+14	24000
<sup>137</sup> Cs	6,3E-03	1,14E+11	3,1	<sup>202m</sup> Pb	5,0E+06	1E+15	27000
				<sup>203</sup> Pb	2,0E+06	3,9E+14	10643

При выбросах нескольких радионуклидов  $V_i$  должно удовлетворяться условие:

$$\sum V_i / ДВ_i, \text{реактора} + \sum V_i / ДВ_i, \text{РХК} < 1$$

Сумма отношений активности фактически выбрасываемых радионуклидов к ПДВ каждого радионуклида не должна превышать единицу.

#### РАСЧЕТ УРОВНЕЙ И ХАРАКТЕР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Расчет распределения радионуклидов в приземном слое проведен с использованием программного комплекса Эколог (версия 3.0). Расчет проводился на площадках с размерами: 3000×3000 метров, шаг 100×100 м, при этом использовались реальные выбросы источников загрязнения (данные внешней дозиметрии).

Значения ПДК для каждого радионуклида соответствуют значениям ДООА (кБк/м<sup>3</sup>). Валовые выбросы принимались в ГБк/год. При расчете секундных выбросов (кБк/сек) принято среднегодовое время работы.

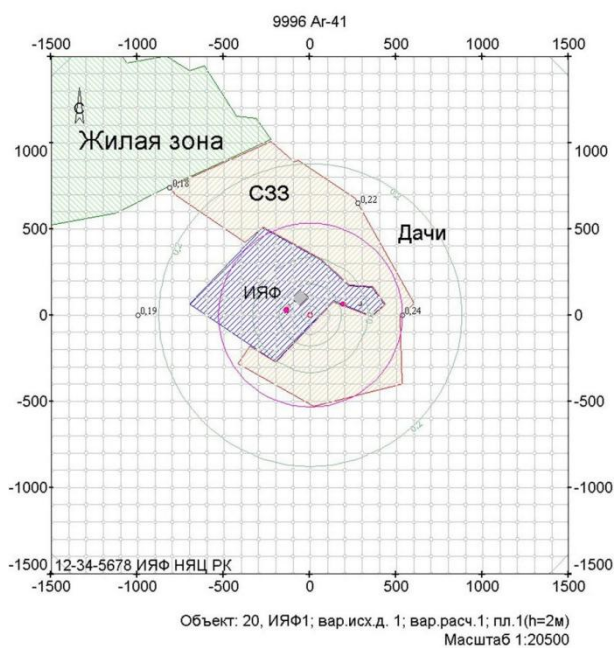


Рисунок 1. Карта распределения <sup>41</sup>Ar в атмосферном воздухе

В связи с малыми значениями выбросов по сравнению с ДООА (ПДК) программа выдает в результатах в основном незначимые величины (0,0000). Поэтому для получения карт распределения концентраций во входных данных ПДК были искусственно занижены в 1000 раз, и все результаты программного расчета См/ПДК в действительности в 1000 раз меньше. На рисунке 1 представлены результаты расчета распределения <sup>41</sup>Ar в атмосферном воздухе.

Результаты расчетов доз в точке максимальной концентрации (х-533), на границе садово-огородных участков (650 м от источника выбросов), на расстоянии 1000 м от источника выбросов и на границе жилой зоны пос. Алатау дают значения факторов безопасности – 3,2·10<sup>-4</sup>, 3·10<sup>-4</sup>, 2,6·10<sup>-4</sup>, 2,4·10<sup>-4</sup>.

#### ОЦЕНКА ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК НА НАСЕЛЕНИЕ

Оценка дозовых нагрузок населения произведена путем сопоставления рассчитанных допустимых пределов радиационных параметров с результатами радиационного мониторинга.

Из техногенных радионуклидов в выпадениях зарегистрирован только Со-60, <sup>65</sup>Zn и <sup>137</sup>Cs, остальные радионуклиды ниже порога обнаружения.

Выброс радионуклидов из трубы реактора определен произведением годового объема выброса на удельную активность радионуклида в трубе. Выброс незарегистрированного <sup>137</sup>Cs принят, как произведение предела чувствительности методики и объема выброса.

Работы по расфасовке препаратов <sup>131</sup>I в лаборатории РХК проводятся периодически, не чаще 1 раза в месяц, поэтому выброс <sup>131</sup>I из РХК определен произведением объема выброса за время работы (6,5E+6 м<sup>3</sup>) на удельную активность <sup>131</sup>I в воздухе в помещении.

Использованные при оценке дозовых нагрузок результаты радиационного мониторинга, соответствующие величины фактора, пределы фактора и вытекающие дозовые нагрузки представлены в таблице 3.

Расхождение в результатах оценки обусловлено влиянием <sup>137</sup>Cs глобального распространения от испытаний (по Оценкам Научного Комитета по Действию Атомной радиации 2000 г около 3,5 мкЗв/год) и погрешностями методик измерения.

По результатам оценки можно заключить, что радиационное влияние ИЯФ на окружающее население менее 5 мкЗв в год, т.е. менее 0,5 % от предела техногенной дозы на население.

**К ВОПРОСУ УЧЕТА ТЕХНОГЕННЫХ РАДИАЦИОННЫХ РИСКОВ  
ПРИ ОЦЕНКЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**

Таблица 3. Оценка максимального радиационного воздействия ИЯФ на критические группы лиц из населения

Фактор радиационного воздействия	Результаты измерений		Величина фактора, Бк/год	Предел по уровню 330 мкЗв/год	Обусловленная годовая доза, мкЗв
Газовый выброс реактора,	Объемная активность до 1,6Е+5 Бк/м <sup>3</sup>		1,1Е+10 <sup>13</sup> в том числе 1Е+10 <sup>13</sup> <sup>41</sup> Ag, 1Е+10 <sup>12</sup> другие нуклиды	1,66Е+16	0,219
				1,04Е+16	0,035
Аэрозольный выброс реактора	Объемная активность до 0,1 Бк/м <sup>3</sup> , в том числе (в Бк/м <sup>3</sup> )		6Е+7 в том числе	6,45Е+10	
	<sup>60</sup> Со	1,9Е-02	1,12Е+07	4,8Е+11	7,7Е-03
	<sup>65</sup> Zn	9,0Е-05	5,31Е+04	9,3Е+11	1,9Е-05
	<sup>131</sup> I	3,4Е-03	2,01Е+06	5,6Е+11	1,2Е-03
	<sup>137</sup> Cs	1,0Е-04	5,9Е+04	1,1Е+11	1,8Е-04
Общая доза, мкЗв/год					0,263
Аэрозольный выброс РХК	<sup>131</sup> I	2,7	1,76Е+07	8,5Е+11	6,8Е-03
Выпадение радионуклидов	Результаты измерений, Бк/м <sup>2</sup> /месяц		Величина фактора Бк/м <sup>2</sup> год	Предел по уровню 1000 мкЗв/год, Бк/м <sup>2</sup> год	Обусловленная доза, мкЗв/год
	радионуклид				
	Со-60		2,5	2480	1,0
	<sup>65</sup> Zn		2	4820	0,4
	<sup>137</sup> Cs		2,5	587	4,3
Общая доза, мкЗв/год					5,7

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования и практические расчеты позволяют сделать вывод, что для учета техногенных радиационных рисков при оценке воздействия ядерных установок на окружающую среду необходимо совместное комплексное использование методологических положений и алгоритмов, предлагаемых методическими указаниями ПДВ-83 и руководством ДВ-98, с возможностями программ автоматизированного расчета загрязнения атмосферы. Получаемые при этом модели рассеивания загрязняющих радионуклидов в атмосферу и значения допустимых выбросов радионуклидов позволяют объективно оценить воздействие ядерных установок на загрязнение атмосферы и определить предел дозовых нагрузок на население.

Значения Допустимого Выброса (ДВи) радионуклидов рассчитаны, в соответствии с определением

18 и п. 3.1.2 НРБ-99 и требованиями ПДВ-83, как величины годового выброса радионуклида в атмосферу из одного источника (реактора, корпуса радиохимических лабораторий), обуславливающие с коэффициентом запаса 3 получение критической группой лиц из населения менее допустимой годовой эффективной дозы 1 мЗв от воздействия только i-го радионуклида с учетом всех факторов радиационного воздействия (внешнего облучения от облака и оседающей активности, поступления радионуклидов ингаляцией и перрорально).

Для реактора ВВР-К максимальное влияние радиоактивных выбросов 2003-2007 (на границе садово-огородных участков не превышало 0,5 % от предела дозы на население), а критическая точка, где реализуется максимальное значение фактора безопасности, равно 0,00032 располагается в радиусе до 650 м от источников выбросов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99), СП 2.6.1. 758-99 Издание официальное. – Алматы, 2000.-80с.
2. Санитарно-гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности МЗ РК: СанПиН №5.01.030.03: утв. Министерством здравоохранения РК 31.01.2003 г.
3. Международные основные нормы безопасности для защиты от ионизирующих излучений и безопасного обращения с источниками излучений. МАГАТЭ. Вена, 1997
4. Схемы распада радионуклидов. Энергия и интенсивность излучения: Публикация 38 МКРЗ. в 2-х ч.: Пер. с англ.- М.: Энергоатомиздат, 1987.
5. Отраслевые методические указания по расчету предельно допустимых выбросов загрязняющих атмосферу радиоактивных и химических веществ ПДВ-83. Минсредмаш СССР, 1985.
6. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. РНД 211.2.01.01-97. Алматы, 1997
7. Руководство по установлению допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферу (ДВ-98), М: Госкомэкологии России; Минатом России, 1999 г.
8. Рекомендации по оформлению и содержанию проекта предельно – допустимых выбросов в атмосферу (ПДВ) для предприятия Республики Казахстан. РНД 211.2.02.02 – 97. Алматы, 1997.

**ҚОРШАҒАН ОРТАҒА ЯДРОЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫНЫҢ ӘСЕРІН БАҒАЛАУНДАҒЫ  
ТЕХНОГЕНДІК РАДИАЦИЯЛЫҚ ТӘУЕКЕЛДІГІН ТҮГЕДЕУ СҰРАҒЫНА**

**Артёмов В.А., Кабдрахимова Г.Д., Полешко А.Н.**

*ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан*

ҚР ҰЯО Ядролық физика институтының нысандарынан: ССР-Қ реакторынан және радиохимиялық зертханалар корпусынан атмосфераға шығатын радиактивті заттардың ауаны шығарындылар нормативтеріне негіздеме жүгізілген, бұнда персонал мен тұрғындарға тиетін дозалық жүктеме РКН-99 регламенттеген шектерден асып кетпейді. Радиактивті шығындылардан келетін сыртқы сәулелену дозаларын есептеп шығарылған. Жағымсыз әсер ету дәрежесі мен сипаты бойынша аумақты өңірлеге бөлу карталары «Эколог» v3.0 қолданбалы бағдарламалар пакеті бойынша алынған.

**TO THE PROBLEM OF MAN RADIATION RISKS IN IMPACT  
ASSESSMENT OF NUCLEAR INSTALLATIONS FOR THE ENVIRONMENT**

**V.A. Artyomova, G.D. Kabdrahimova, A.N. Poleshko**

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

A substantiation of standards of acceptable emissions of radioactive substances into the atmosphere from the Institute of Nuclear Physics NNC: VVR-K reactor and the shell of radiochemical laboratory, where the dose loads on the personnel and the population does not exceed the limits regulated by NRB-99. Calculated dose of external exposure to radioactive emissions. Get a map of the zoning on the extent and nature of the negative impact of the application package «Эколог» v3.0.



УДК 553.495 (235.216)

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК ЖИТЕЛЕЙ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ, НАХОДЯЩИХСЯ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ УРАНОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Кабдрахимова Г.Д., Артёмов В.А., Полешко А.Н.

*Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан*

В данной работе оценено существующее радиоэкологическое состояние Степногорского хвостохранилища и отработанных урановых рудников. Определены уровни концентрации радона в воздухе жилых и производственных помещений и рассчитаны дозовые нагрузки на население на примере п.Аксу, находящегося в зоне потенциального влияния хвостохранилища.

**ВВЕДЕНИЕ**

Серьезную экологическую угрозу в Казахстане представляет радиоактивное загрязнение, одним из источников являются отходы неработающих предприятий уранодобывающей и перерабатывающей промышленности (отвалы урановых рудников, самоизливающиеся скважины хвостохранилища, демонтированное оборудование технологических линий).

Имеется шесть крупных ураноносных геологических провинций, множество мелких месторождений и рудопоявлений урана, которые обуславливают повышенный уровень естественной радиоактивности, отходы, накопленные на уранодобывающих предприятиях и в местах проведения ядерных взрывов. На данных территориях Казахстана существует потенциальная возможность повышенного выделения природного радиоактивного газа – радона, который представляет реальную угрозу для здоровья человека. Обеспечение радоновой безопасности – одна из важнейших проблем экологии, которая активно обсуждается в последние два десятилетия. Исследованиями последних лет установлено, что около 60% эффективной дозы человека обусловлено естественными источниками радона. При этом около 80% облучения обусловлено радоном и продуктами его распада в помещениях, поэтому проблема радиационной безопасности жилищ интенсифицировалась исследованиями во многих странах в последние годы [1].

Целью данной работы является изучение эколого-радиационной обстановки в уранодобывающих регионах Северного Казахстана и воздействие ее на окружающую среду и здоровье населения.

Для достижения поставленной цели предусматривалось решение следующих задач:

- комплексное обследование региона;
- оценка дозовых нагрузок на население на примере п. Аксу;
- выявление источников поступления радона.

**ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ**

Объектом урановой промышленности, подлежащим первоочередному обследованию, явилось хвостохранилище Степногорского горно-обогатительного комбината. Хранилище радиоактивных отходов уранового производства бывшего Целинного Горнохимического Комбината, крупнейшее в Казах-

стане и одно из крупнейших в мире, находится в 25 км от г. Степногорска и в 160 км от г. Астаны. В настоящее время вокруг него сложилась критическая ситуация. Суть ее заключается в том, что хвостохранилище площадью около 800 га и количеством в 45 млн. тонн мелкодисперсной радиоактивной пульпы (суммарной радиоактивностью 150 тыс. кюри радия), может быть относительно безопасным в случае его постоянного обводнения. С 1996 года добыча и обработка урановой руды сократилась, обводнение радиоактивных отходов стало недостаточным. На сегодняшний день обводняется только 1/3 часть, а 2/3 части площадью 500 га представляют собой пылящие радиоактивные пляжи. Самое тревожное заключается в том, что мы не можем оценить в строгой количественной форме экологический вред этого радиоактивного загрязнения, т.к. на полномасштабную экспертизу нет средств. С каждым годом ветровая эрозия хвостохранилища усиливается. В городе и поселках высок процент онкологических заболеваний, велики и социально-психологические потери. В стране сложился негативный имидж Степногорска как экологически неблагоприятного города, города, в котором опасно жить. Поэтому, наряду с экономическим, экологический фактор является одним из стимулов оттока населения. На основании этого было оценено существующее радиоэкологическое состояние Степногорского хвостохранилища и отработанных урановых рудников, а также населенных пунктов, находящихся в зоне их потенциального влияния и определены оптимальные объемы необходимых полевых исследований.

**РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ, НАХОДЯЩИХСЯ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ХВОСТОХРАНИЛИЩА**

Радон является инертным радиоактивным газом, в основном он эманурует из почвы или грунта в открытую атмосферу и быстро в ней растворяется до незначительной концентраций, не представляющих опасности для человека.

Концентрация радона в помещениях зависит от концентрации радона для данного участка территории относительно его содержания в почве и коэффициента кратности снижения в зависимости от конструктивной особенности зданий и стройматериалов [2].

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК ЖИТЕЛЕЙ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ,  
НАХОДЯЩИХСЯ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ УРАНОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Основными источниками для поступления радона внутрь помещений служат: почва или грунт под зданием и около него, строительные материалы, источники водоснабжения, природный газ и атмосферный воздух [3].

Для определения уровня концентрации радона в воздухе жилых и производственных помещений и оценки дозовых нагрузок на население было выполнено радиоэкологическое обследование п. Аксу, находящегося в зоне потенциального влияния хвостохранилища.

**Уровень концентрации радона в воздухе жилых и производственных помещений**

Определение ЭРОАРа проводилось в жилых и производственных помещениях населенных пунктов. Измерения проводились с помощью прибора РАМОН - РАДОН – 01. В поселке Аксу было проверено 16 физических точек, результаты приведены в таблице 1. Предельно допустимая концентрация для эксплуатирующихся жилых помещений составляет 200 Бк/м<sup>3</sup>, для вновь построенных зданий – 100 Бк/м<sup>3</sup>.

Таблица 1. Концентрация радона в воздухе жилых и производственных помещений п. Аксу

№ п/п	Радон, Бк/куб.м	Место отбора	Адрес	Примечание
1	80	дом	ул. Школьная 43	
2	503	погреб	ул. Школьная 43	глубина 2м, глина
3	5	дом	ул. Автомобилистов 1/1	
4	53	погреб	ул. Автомобилистов 1/1	шлакоблок на фунда., гл. 2,3м
5	5536	дом	ул. Рудничная 18	
6	89	погреб	ул. Рудничная 18	глубина 2,5м, глина
7	53	дом	ул. Титова 13	
8	209	погреб	ул. Титова 13	глубина 1,8м, глина
9	221	дом	ул. Майская 67	
10	3496	погреб	ул. Майская 67	глубина 1,8м, глина-0,8м; ниже спальник
11	341	дом	ул. Горького 30	
12	1015	погреб	ул. Горького 30	глубина 3м, скальник
13	315	спортзал	Средняя школа №1	у входа
14	425	спортзал	Средняя школа №1	в конце зала
15	385	мастерская	Средняя школа №1	
16	3666	подвал	Средняя школа №1	

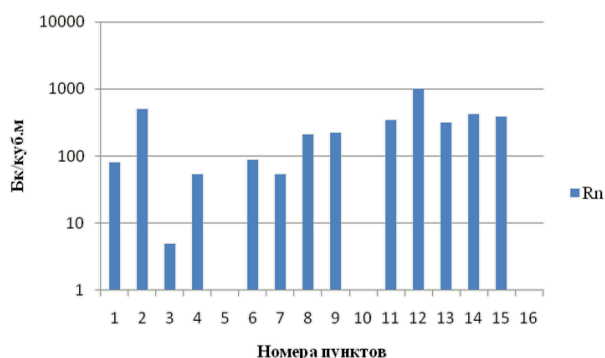


Рисунок 1. Концентрация радона в помещениях и населенных пунктах п. Аксу

Как видно из рисунка 1, в воздухе помещений п. Аксу в ряде случаев фиксируются чрезвычайно высокие объемные концентрации радона и дочерних продуктов его распада, отмечены концентрации радона, достигающие 5536 Бк/м<sup>3</sup> и превышающие в 27 раза ПДК (при среднем значении 1025 Бк/м<sup>3</sup>). При проведении последующих этапов исследований необходимо особое внимание уделить радоновой проблеме и выработке практических мер по ее снижению.

**Расчет дозовых нагрузок на население п. Аксу**

Определение эффективной дозы проводилось по «Методике определения эффективной дозы ионизирующего излучения на персонал и население» (022/10639 от 17.05.07 г., Реестр государственной системы технического регулирования).

В соответствии с Методикой, эффективная доза определена по формуле:

$$E = E_k + E_\gamma + E_\beta + E_n + E_{дпр} + \sum E_{i \text{ инт}} + \sum E_{k \text{ пиц}}$$

где  $E_k$  - доза космического излучения,  $E_\gamma$  - доза внешнего гамма-излучения,  $E_\beta$  - доза внешнего бета-излучения,  $E_n$  - доза нейтронного излучения,  $E_{i \text{ инт}}$  - ожидаемая доза от поступления в организм i-го радионуклида через органы дыхания (кроме дочерних продуктов распада радона и торона),  $E_{дпр}$  - доза от поступления в организм дочерних продуктов распада (ДПР) радона и торона,  $E_{k \text{ пиц}}$  - ожидаемая доза от поступления в организм i-го радионуклида через органы пищеварения.

Наряду с данными, полученными лабораториями ИЯФ при проведении мониторинга села Аксу, в работе использовалась также опубликованная радиоэкологическая информация. Ниже представлена результаты расчета эффективной дозовой нагрузки на население п. Аксу (таблица 2)

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК ЖИТЕЛЕЙ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ,  
НАХОДЯЩИХСЯ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ УРАНОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Таблица 2. Сводная таблица фоновых эффективных дозовых нагрузок населения п. Аксу

№ п/п	Вид монофакторного воздействия	$E_i$ , мкЗв/год	$E_{\text{сум}}$ , мкЗв/год
1	Космическое ионизирующее излучение	284	282,98
2	Гамма-излучение ест. радионуклидов	136,32	901
	Почвы		
3	Материала зданий	764,8	
4	ДПР радона и торона	30,7	30,7
5	Искусст. радионуклидов	1,05	1,05
6	Бета-излучение ест. радионуклидов	0,18	0,09
7	Искусств. радионуклидов	0,001	0,001
8	Нейтронное излучение	77	77
9	Ингаляция	3770	3870
	ДПР радона		
10	ДПР торона	100	
11	Питание	383,21	389
	Естественные радионуклиды		
12	Искусств. радионуклиды	6,13	
13	$E_{\text{сум}}$		5452

Ниже представлена диаграмма, где можно наглядно увидеть в процентном содержании факторы воздействия на население (рисунок 2).

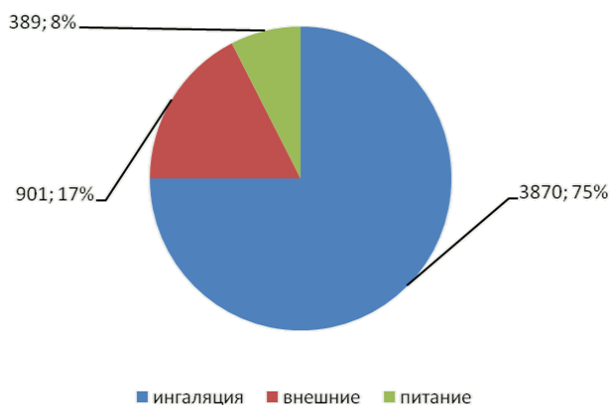


Рисунок 2. Суммарная эффективная доза населения Аксу

Как видно из таблицы 2, эффективная доза жителей села Аксу равна 5452 мкЗв/год. Дозовые нагрузки в 2,3 раза выше среднемирового уровня 2400 мкЗв/год (Доклад Научного комитета ООН по действию атомной радиации за 2000 год) для районов с нормальным фоном. По информации, полученной от местных жителей, в этом месте ранее были расположены отвалы уранового рудника, которые при строительстве поселка рекультивировали.

Эффективные дозы от искусственных радионуклидов соответствуют их глобальному распределению, не превышают 12 мкЗв/год и значительно ниже допустимого предела 1000 мкЗв/год.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Radon and its decay products in indoor air / W.W. Nazaroff [et al]. – New York a.c.: John Wiley and Sons Inc., 1988. – 518 с.
2. Крисюк, Э.М. Радиационный фон помещений / Э.М. Крисюк. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 120 с.
3. Севостьянов, В.Н. Проблема радоноопасности в Казахстане / В.Н.Севостьянов. – Алматы: КазгосИНТИ, 2004. - 212 с.

Основную дозу население села Аксу получает за счёт ингаляции дочерних продуктов распада радона и торона вследствие проживания в одноэтажных домах.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные экспериментальные данные являются предварительными ввиду недостаточности объемов информации, необходимой для получения статистически значимых результатов, в том числе и оценки влияния хвостохранилища.

Вместе с тем по имеющимся результатам измерений можно сделать нижеследующие выводы:

1. Дозовые нагрузки выше среднемирового уровня для районов с нормальным фоном.

2. Основной вклад в дозовые нагрузки на население этого населенного пункта вносят аномально-высокие объемные концентрации радона в воздухе помещений при ингаляции.

3. Наличие в некоторых помещениях поселка высокой Сэроа ДПР (до 5536 Бк/м<sup>3</sup> – во много раз выше допустимой) может обусловить повышение эффективной дозы до 80 мЗв в год при допустимой для населения 10 мЗв в год. Причиной также может быть использование запрещенных стройматериалов либо наличие зон с интенсивным потоком радона. Влияние хвостохранилища исключено.

4. Для определения реальных эффективных доз необходимы более детальные исследования:

- более подробное определение МЭД в производственных и жилых помещениях.
- измерение Сэроа ДПР интегральными дозиметрами в течение года.

**УРАН ӨНЕРКӘСІП КӘСІПОРЫНДАРЫНЫҢ ЫҚПАЛ ЕТУ АЙМАҒЫНДА ОРНАЛАСҚАН  
ЕЛДІ-МЕКЕНДЕР ТҰРҒЫНДАРЫНА ТИЕТІН ДОЗАЛЫҚ ЖҮКТЕМЕНІ АЛДЫН АЛА БАҒАЛАУ**

**Кабдрахимова Г.Д., Артемова В.А., Полешко А.Н.**

*ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан*

Бұл жұмыста Спетногорск қалдықсақтау және уран кендерінің қазіргі радиэкология жағдайы бағаланды. Тұрғын және өндірістік жайларының ауасындағы радон концентрациясының деңгейі анықталды және Ақсу елді-мекен үлгісінде қалдықсақтаушының потенциалды ықпал ету аймағында орналасқан, тұрғындарына тиетін дозалық жүктемесі есептелінді.

**PRELIMINARY ASSESSMENT OF DOSE RATES INHABITANTS  
IN ZONE OF INFLUENCE OF URANIUM INDUSTRY**

**G.D. Kabdrahimova, V.A. Artemova, A.N. Poleshko**

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

In this paper we evaluate the current state of radioecological Stepnogorsk tailings and waste uranium mines. Determined the levels of radon concentrations in air of residential and industrial premises and calculated dose loads on the population on the example of the village of Aksu located in the zone of potential impact of the tailings.

## СПИСОК АВТОРОВ

- Айдарханов А.О., 18  
Акылбек Н.М., 77  
Алдабергенова Т.М., 101  
Алдияров Н.У., 77  
Алексеев Г.Г., 38  
Антонюк В.И., 44  
Аргёмова В.А., 182, 187  
Ахметов К.М., 77  
Бакланов В.В., 86, 149  
Баранов С.А., 128  
Бахтин Л.В., 18  
Бекен Р.Е., 77  
Витюк Г.А., 73  
Глущенко Н.В., 80  
Гордиенко Д.Д., 113  
Горлачев И.Д., 80  
Гусев М.Н., 11  
Дерявко И.И., 149  
Диков А.С., 96  
Дубровин В.И., 164, 172  
Дьячков В.В., 38  
Дядов С.И., 143  
Ермаков Е.Л., 96  
Жаканбаев Е.А., 26  
Жданов В.С., 86  
Зазулин Д.М., 5  
Захарова О.В., 178  
Зуев В.А., 143
- Игнашев В.И., 143  
Избасханова А.Т., 158  
Иманбеков Ж.Ж., 44, 50  
Иркимбеков Р.А., 73  
Кабдрахимова Г.Д., 182, 187  
Кабдыракова А.М., 136  
Кенжин Е.А., 158  
Керимкулов Ж.К., 5  
Кириленко А.В., 93  
Кислицин С.Б., 96, 101  
Князев Б.Б., 80  
Колокольцов М.В., 57, 63  
Комаров И.И., 178  
Коровиков А.Г., 57, 68  
Коспанов Н., 101  
Котов В.М., 30, 73  
Кретинин А.А., 57, 63  
Кукушкин И.М., 149  
Кукушкин С.М., 119  
Курпешева А.М., 30  
Ларионова Н.В., 18, 136  
Лукашенко С.Н., 18, 136  
Лысухин С.Н., 80  
Ляхова О.Н., 18  
Магашева Р.Ю., 136  
Макаров Д.А., 57, 63  
Максимкин О.П., 11  
Микиша А.В., 143
- Мукенева С.А., 119  
Ольховик Д.А., 68  
Перепёлкин А.И., 128  
Платов А.В., 80  
Поддубная Е.В., 44, 50  
Полешко А.Н., 182, 187  
Полтавцева В.П., 96  
Поляков А.Н., 44, 50  
Саблук В.В., 86  
Свинухов Д.С., 86  
Сейнасинов Н.А., 113  
Слюсарев А.П., 50, 101  
Смирнов А.А., 172  
Соколова И.Н., 33  
Субботин С.Б., 18  
Тарасенко Е.В., 149  
Токтогулова Д.А., 11  
Тулешев Ю.Ж., 26  
Тур Е.С., 119  
Узбеков А.Н., 33  
Цынгаев В.М., 119  
Чихрай Е.В., 68  
Чудинова М.В., 57, 63  
Шаймерденов А.А., 107  
Шаповалов Г.В., 57  
Шипилов Д.В., 57  
Шипилов П.В., 57, 68  
Юшков А.В., 38





---

## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи предоставляются в виде электронной (на гибком диске или по электронной почте присоединенным (attachment) файлом) в формате MS WORD и печатной копии.

Текст печатается на листах формата А4 (210×297 мм) с полями: сверху 30 мм; снизу 30 мм; слева 20 мм; справа 20 мм, на принтере с высоким разрешением (300-600 dpi). Горизонтальное расположение листов не допускается.

Используются шрифт Times New Roman высотой 10 пунктов для обычного текста и 12 пунктов для заголовков. Пожалуйста, для заголовков используйте стили (Заголовок 1, 2...) и не используйте их для обычного текста, таблиц и подписанных подписей.

Текст печатается через одинарный междустрочный интервал, между абзацами – один пустой абзац или интервал перед абзацем 12 пунктов.

В левом верхнем углу должен быть указан индекс УДК. Название статьи печатается ниже заглавными буквами. Через 3 интервала после названия, печатаются фамилии, имена, отчества авторов и полное наименование, город и страна местонахождения организации, которую они представляют. После этого, отступив 2 пустых абзаца или с интервалом перед абзацем 24 пункта, печатается основной текст.

### **При написании статей необходимо придерживаться следующих требований:**

- Статья должна содержать аннотации на казахском, английском и русском языках (130-150 слов) с указанием названия статьи, фамилии, имени, отчества авторов и полного названия, города и страны местонахождения организации, которую они представляют;
- Ссылки на литературные источники даются в тексте статьи цифрами в квадратных [1] скобках по мере упоминания. Список литературы следует привести по ГОСТу 7.1-2003;
- Иллюстрации (графики, схемы, диаграммы) должны быть выполнены на компьютере (ширина рисунка 8 или 14 см), либо в виде четких чертежей, выполненных тушью на белом листе формата А4. Особое внимание обратите на надписи на рисунке – они должны быть различимы при уменьшении до указанных выше размеров. На обороте рисунка проставляется его номер. В рукописном варианте на полях указывается место размещения рисунка. Рисунки должны быть представлены отдельно в одном из форматов \*.tif, \*.gif, \*.png, \*.psx, \*.dxf с разрешениями 600 dpi.
- Математические формулы в тексте должны быть набраны как объект Microsoft Equation или MathType. Химические формулы и мелкие рисунки в тексте должны быть вставлены как объекты Рисунок Microsoft Word. Следует нумеровать лишь те формулы, на которые имеются ссылки.

### **К статье прилагаются следующие документы:**

- рецензия высококвалифицированного специалиста (доктора наук) в соответствующей отрасли науки;
- выписка из протокола заседания кафедры или методического совета с рекомендацией к печати;
- акт экспертизы (экспертное заключение);
- на отдельном листе автор сообщает сведения о себе: фамилия, имя, отчество, ученая степень, должность, кафедра и указывает служебный и домашний телефоны, адрес электронной почты.

Текст должен быть тщательным образом выверен и отредактирован. В конце статья должна быть подписана автором с указанием домашнего адреса и номеров служебного и домашнего телефонов, адрес электронной почты.

Статьи, оформление которых не соответствует указанным требованиям, к публикации не допускаются.

---

---

**Ответственный секретарь** д.т.н. М.К. Мукушева  
тел. (722-51) 2-33-35, E-mail: MUKUSHEVA@NNC.KZ

**Технический редактор** А.Г. Кислухин  
тел. (722-51) 2-33-33, E-mail: KISLUHIN@NNC.KZ

---

**Адрес редакции:** 071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Тәуелсіздік, б.  
<http://www.nnc.kz/vestnik>

---

© Редакция сборника «Вестник НЯЦ РК», 2001.

---

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

---

---

Тираж 300 экз.

---

Выпуск набран и отпечатан в типографии  
**Национального ядерного центра Республики Казахстан**  
071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Тәуелсіздік, б.

