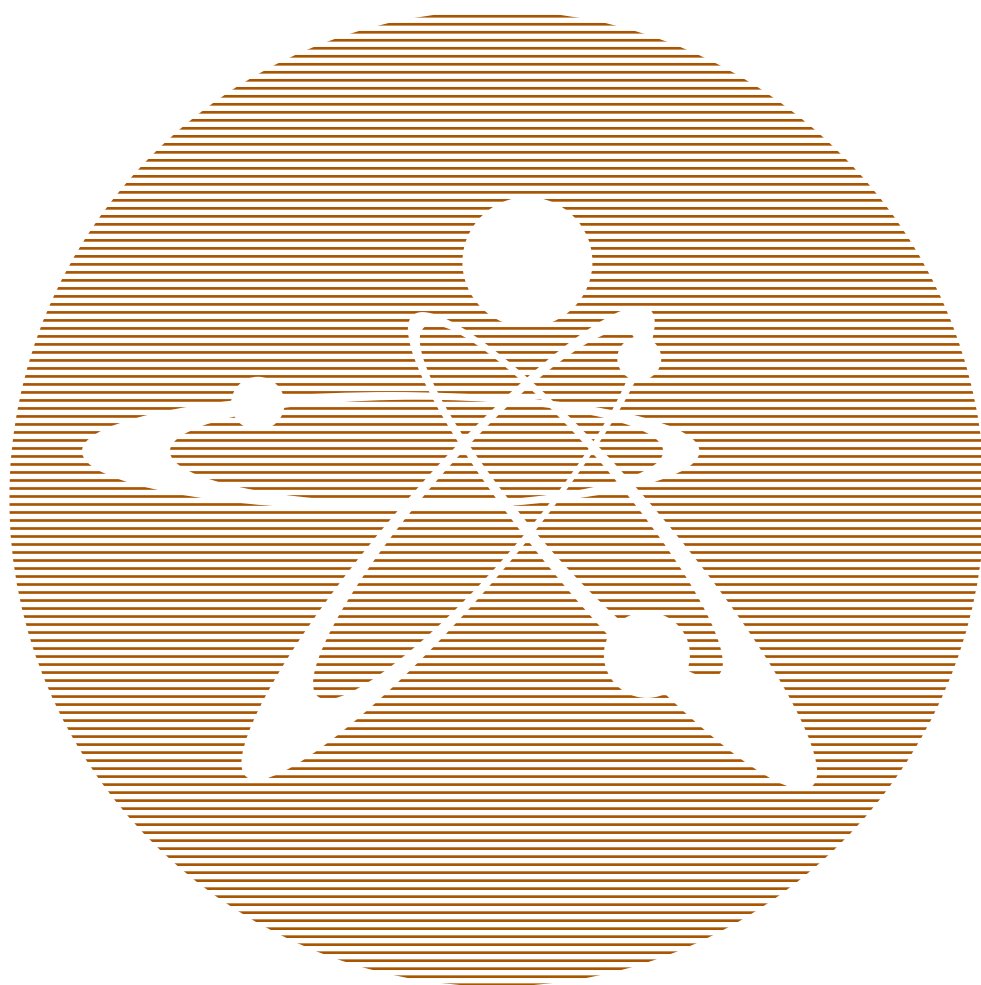


2018  
ВЫПУСК 3

ISSN 1729-7516

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ВЕСТНИК



## **Вестник НЯЦ РК**

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 3(75), СЕНТЯБРЬ 2018

*Издается с января 2000 г.*

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

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

## **ҚР ҰЯО Жаршысы**

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ  
МЕРЗІМДІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛЫ

3(75) ШЫҒАРЫМ, ҚЫРҚҮЙЕК, 2018 ЖЫЛ

## **NNC RK Bulletin**

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

ISSUE 3(75), SEPTEMBER 2018

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>КОНТРОЛЬ СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОЛОСАХ ЖИТЕЛЕЙ ГОРОДА УСТЬ-КАМЕНОГОРСКА</b>                                                                                             |    |
| Оспанова Ж.А., Кабдрахманова С.К., Троеглазова А.В., Зайнелова Г.З., Павленко А.В., Вноровская Е.В.....                                                                            | 5  |
| <b>ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ <math>Fe_xNi_{100-x}</math> НАНОТРУБОК</b>                                                                                                     |    |
| Боргеков Д.Б., Козловский А.Л., Здоровец М.В., Кадыржанов К.К. ....                                                                                                                | 9  |
| <b>АНАЛИЗ ПРОЕКТНОЙ АВАРИИ НА РЕАКТОРЕ ИВГ.1М С ВЫБРОСОМ РАБОЧЕГО ОРГАНА СУЗ</b>                                                                                                   |    |
| Мартыненко Е.А., Гановичев Д.А., Акаев А.С., Хажиудинов А.С., Жагипарова Л.К. ....                                                                                                 | 14 |
| <b>РЕАКТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ВОДООХЛАЖДАЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КАНАЛОВ С ТОПЛИВОМ НИЗКОГО ОБОГАЩЕНИЯ В РАМКАХ КОНВЕРСИИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ИВГ.1М</b>                            |    |
| Скаков М.К., Вурим А.Д., Гныря В.С., Азимханов А.С., Колбаенков А.Н., Дербышев И.К., Нуржанов Е.Б.....                                                                             | 18 |
| <b>РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА</b>                                                                                     |    |
| Жагипарова Л.К., Котов В.М. ....                                                                                                                                                   | 22 |
| <b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ НА САМОПОГЛОЩЕНИЕ ГАММА-КВАНТОВ ПРИ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ «ТОЛСТЫХ» ОБРАЗЦОВ ИЗ ДИОКСИДА УРАНА</b> |    |
| Жмук Д.В., Медетбеков Б.С., Попов Ю.А. ....                                                                                                                                        | 28 |
| <b>ТРЕТИЙ ЭТАП МОДЕРНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ИВГ.1М</b>                                                                             |    |
| Коровиков А.Г., Ильиных С.А., Ермаков В.А., Серикбаев Б.С. ....                                                                                                                    | 33 |
| <b>ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕРМОДЕСОРБЦИОННОГО АНАЛИЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММИРУЕМОГО НАГРЕВА ОБРАЗЦОВ НА ИМИТАЦИОННОМ СТЕНДЕ С ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОЙ УСТАНОВКОЙ</b>            |    |
| Туркач А.А., Гановичев Д.А., Туленбергенов Т.Р., Соколов И.А., Ермаков В.А. ....                                                                                                   | 40 |
| <b>ВАЛИДАЦИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВОТК-НУО РЕАКТОРА ИВГ.1М</b>                                                                                                                   |    |
| Хажиудинов А.С., Гановичев Д.А., Акаев А.С., Мартыненко Е.А., Хажиудинова А.Р. ....                                                                                                | 45 |
| <b>РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСА РЕАКТИВНОСТИ, НЕОБХОДИМОГО ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПУСКА РЕАКТОРА ИГР</b>                                                                  |    |
| Вурим А.Д., Гайдайчук В.А., Котляр А.Н., Козловский Е.В., Миллер А.А., Олжаев И.Т., Журкин С.А., Цхе В.К. ....                                                                     | 50 |
| <b>МОДИФИЦИРОВАНИЕ СВОЙСТВ YSZ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ АРГОНА И КИСЛОРОДА</b>                                                                                                 |    |
| Хромушин И.В., Аксенова Т.И., Ермолаев Ю.В., Тусеев Т.Т. ....                                                                                                                      | 55 |
| <b>НОВАЯ ИНФРАЗВУКОВАЯ ГРУППА МАКАНЧИ И ЕЕ ВОЗМОЖНОСТИ В РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ</b>                                                                          |    |
| Дубровин В.И., Смирнов А.А. ....                                                                                                                                                   | 63 |
| <b>ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА ПРИ ОЦЕНКЕ ДИНАМИКИ ОБВОДНЕНИЯ ГРУНТОВ В МЕСТАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ (НА ПРИМЕРЕ ВВР-К ИЯФ)</b>                                                |    |
| Шульга М.В., Жолдыбаев А.К., Кушербаева Н.Н. ....                                                                                                                                  | 67 |
| <b>СЕЙСМИЧНОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАЗАХСТАНА И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МОНИТОРИНГА ЭТОГО РЕГИОНА</b>                                                                                       |    |
| Узбеков А.Н., Михайлова Н.Н. ....                                                                                                                                                  | 73 |

|                                                                                                                                                                          |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ <math>\text{Cu}</math> ПЛЕНОК В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКО-ЭНЕРГЕТИЧНЫХ ИОНОВ</b>                                                     |            |
| Калиекперов М.Е., Шлимас Д.И., Козловский А.Л., Кадыржанов К.К. ....                                                                                                     | 83         |
| <b>ПОЛУЧЕНИЕ ПУЧКОВ ИОНОВ МЕТАЛЛОВ НА ЭЦР-ИСТОЧНИКЕ DECRIS-3 МЕТОДАМИ НАГРЕВА ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ</b>                                                                        |            |
| Иванов И.А., Самбаев Е.К., Козин С.Г., Курахмедов А.Е., Мустафин Д.А., Александренко В.В., Бондарченко А.Е., Логинов В.Н., Богомолов С.Л. ....                           | 87         |
| <b>РАЗРАБОТКА МОДЕЛЬНОЙ ТВС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ С МГНОВЕННОЙ БЛОКИРОВКОЙ ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В РЕАКТОРЕ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ</b>                        |            |
| Витюк В.А., Вурим А.Д., Котов В.М., Витюк Г.А., F. Serre, F. Payot, C. Suteau, L. Trotignon ....                                                                         | 93         |
| <b>СТРУКТУРНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ В СТАЛИ 20ГЛ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКИ</b>                                                                          |            |
| Рахадиллов Б.К., Байжан Д.Р., Сагдолдина Ж.Б., Кенесбеков А.Б. ....                                                                                                      | 99         |
| <b>ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОЛИМЕРОВ</b>                                                                                                 |            |
| Рахадиллов Б.К., Буйткенов Д.Б., Акатан К. ....                                                                                                                          | 103        |
| <b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОГЛОЩЕНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В СОРБЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ</b>                                                                                  |            |
| Кульсартов Т.В., Заурбекова Ж.А., Чихрай Е.В. ....                                                                                                                       | 107        |
| <b>ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ КАРБИДА УРАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ</b>                                     |            |
| Семейко К.В. ....                                                                                                                                                        | 111        |
| <b>EXPERIMENTAL STUDIES IN SUBSTANTIATION OF SODIUM COOLED FAST REACTORS SAFETY</b>                                                                                      |            |
| E.G. Batyrbekov, M.K. Skakov, V.A. Vityuk, V.V. Baklanov, A.D. Vurim, A.V. Pakhnits, K. Kamiyama, K. Matsuba.....                                                        | 117        |
| <b>МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ГЕНЕРАЦИИ И ВЫДЕЛЕНИЮ ТРИТИЯ ИЗ СВИНЦОВО-ЛИТИЕВОЙ ЭВТЕКТИКИ <math>\text{Li15.7Pb}</math> В ПРОЦЕССЕ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ</b> |            |
| Понкратов Ю.В., Тажибаева И.Л., Заурбекова Ж.А., Гордиенко Ю.Н., Гныря В.С., Прозорова И.В., Мартыненко Е.А. ....                                                        | 122        |
| <b>СПИСОК АВТОРОВ.....</b>                                                                                                                                               | <b>129</b> |

УДК 543.62, 574.5

## КОНТРОЛЬ СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОЛОСАХ ЖИТЕЛЕЙ ГОРОДА УСТЬ-КАМЕНОГОРСКА

<sup>1)</sup> Оспанова Ж.А., <sup>2)</sup> Кабдрахманова С.К., <sup>3)</sup> Троеглазова А.В., <sup>1)</sup> Зайнелова Г.З.,  
<sup>1)</sup> Павленко А.В., <sup>1)</sup> Вноровская Е.В.

<sup>1)</sup> Восточно-Казахстанский государственный университет им. С. Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан

<sup>2)</sup> Институт полимерных материалов и технологий, Алматы, Казахстан

<sup>3)</sup> Алтайский филиал ТОО «Казахский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства»,  
Усть-Каменогорск, Казахстан

В данной статье человеческие волосы рассматриваются в качестве биоиндикаторов степени уровня загрязнения окружающей среды токсичными металлами. Согласно проведенным ранее исследованиям, установлено, что продолжительность жизни человека и его трудовая деятельность непосредственно вблизи источников загрязнения влияет на уровень концентрации в его организме тяжелых металлов. Содержание тяжелых металлов в волосах обычно отражает их содержание в других тканях тела [1]. В представленном исследовании были отобраны пробы волос у работников танталового производства АО «Ульбинский металлургический завод». Исследования проводились по отработанной методике [2]. Концентрации токсичных элементов (Ni, Cu, Pb, Cd) определены с помощью атомно-абсорбционного спектрометра МГА-915 (ООО «Люмэкс», Россия). Сделаны предварительные выводы о зависимости содержания некоторых токсичных элементов в тканях волос работников от продолжительности их трудовой деятельности на вредном танталовом производстве.

### ВВЕДЕНИЕ

Рост и состояние волос контролируется системами кровообращения, потоотделения, гормонами и ферментами, а также генетическими факторами и в определенной степени являются характерными показателями физиологических процессов, протекающих в организме. Изменения внешнего вида и химического состава волос являются видимыми признаками недостатка или наличия определенных веществ в организме, поэтому они были выбраны для мониторинга воздействия состояния окружающей среды на человека. Для сравнения, кровь и моча показывают только текущее или недавнее состояние организма и его частей [3]. По сравнению с другими материалами, используемыми для проведения биопсии, волосы имеют различные применения и даже преимущества в отличие от жидкостей организма, таких как пот, кровь и моча и др. Многие особенности волос, такие как безболезненное удаление, легкий сбор и транспортировка, высокая стабильность при комнатной температуре и относительно более высокая концентрация элемента по сравнению с другими жидкостями и тканями организма, делают их подходящим материалом для проведения лабораторных анализов [4]. С другой стороны, анализ волос имеет некоторые ограничения, вызванные появлением экзогенного загрязнения, такого как пыль, косметические или фармацевтические продукты, что способствует дифференциальному увеличению общего содержания различных элементов [5].

В литературе приводится большое количество сообщений о содержании микроэлементов в образцах волос жителей разных городов [6], однако данные о содержании тяжелых металлов, относящихся к разряду экотоксикантов, в волосах жителей круп-

ных промышленных центров (в т.ч. г. Усть-Каменогорск), отсутствуют.

Цель настоящего исследования заключается в определении зависимости концентрации тяжелых металлов в волосах (а следовательно, и во всем организме) работников АО «УМЗ» от продолжительности работы в непосредственной близости к вредному танталовому производству.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы волос отбирали у работников танталового производства АО «Ульбинский металлургический завод». Пробоотбор производили с 3–4 участков затылочной части головы, масса навески составляла от 0,5 г до 1 г. Образцы объединяли в одну пробу массой 0,3–0,5 г. Исследуемые образцы обрабатывали ацетоном с целью удаления поверхностного загрязнения. Навеску исследуемых образцов волос массой 0,5 г помещали в фарфоровые чашки, добавляли смесь азотной и хлорной кислот квалификации «осч» и «хч» соответственно (1:1) и выдерживали при комнатной температуре в течение 24 часов. По истечении указанного времени содержимое фарфоровых чашек выпаривали на песчаной бане досуха при температуре 50 °С, смачивали 1–2 мл дистиллированной воды. Чашки нагревали в течение 5 мин на электрической плитке, контролируя температуру термометром на уровне 50 °С. После охлаждения исследуемые растворы отфильтровывали через обеззоленный фильтр «синяя лента». В приготовленных растворах определяли содержание Ni, Cu, Pb, Cd с использованием атомно-абсорбционного спектрометра с электротермической атомизацией МГА-915 (ООО «Люмэкс», Россия). Градуировку спектрометра осуществляли по градуировочным растворам, приготовленным из стандартных образцов ГСО со-

става растворов ионов никеля (ГСО 7265-69), меди (ГСО 7255-96), свинца (ГСО 7012-93) и кадмия (ГСО 7472-98) с концентрацией 1 мг/см<sup>3</sup>.

Полученные данные классифицировали по 10-ти половозрастным группам. 42 проанализированных образца принадлежат 35 мужчинам и 7 женщинам в возрасте от 25 до 65 лет, входящим в группу зрелого возраста 1 и 2 периодов согласно разработанной классификации. Собранные информация упорядочена в электронную базу данных. Данные по содержанию тяжелых металлов 42 проанализированных образцов волос усреднены по группам продолжительности работы на танталовом производстве и приведены в таблице 1.

Таблица 1. Содержание тяжелых металлов (Ni, Cu, Pb, Cd) по группам продолжительности работы на танталовом производстве в сравнении с биологически допустимым уровнем (БДУ)

| Срок работы | Среднеарифметическое значение массовой концентрации, мкг/г |           |           |           |
|-------------|------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
|             | медь                                                       | никель    | свинец    | кадмий    |
| 5–10 лет    | 2,52*                                                      | 0,05*     | 0,06*     | 0,07      |
| 10–20 лет   | 13,83                                                      | 0,61**    | 0,23*     | 0,12      |
| 20–30 лет   | 24,12**                                                    | 0,82**    | 0,45      | 0,15**    |
| 30–40 лет   | 33,91**                                                    | 1,03**    | 0,54      | 0,30**    |
| БДУ         | 9,0–14,0                                                   | 0,14–0,53 | 0,38–1,40 | 0,02–0,12 |

\* – пониженный уровень, \*\* – повышенный уровень.

Согласно средним значениям содержания всех исследуемых тяжелых металлов в волосах (таблица 1), наблюдается увеличение концентрации в группах с большим стажем работы на рассматриваемом производстве. При этом стоит отметить, что наблюдается резкое увеличение концентрации меди, свинца и никеля в период первых 10 лет работы на танталовом производстве, тогда как рост концентрации кадмия стабилен. Это может быть обусловлено как индивидуальными особенностями накопления и выведения различных металлов из организма человека, так и внешними факторами, в т.ч. объемами выбросов на предприятиях города. После завершения химических анализов оставшихся образцов планируется более детальное рассмотрение основных факторов и источников загрязнения и сопоставление результатов с уровнями БД города Усть-Каменогорска и предприятий. Проведено сравнение средних концентраций с биологически допустимыми уровнями (БДУ) по отдельным металлам [7]. Результаты по группе исследуемых со стажем работы 5–10 лет показали низкое или в пределах нормы содержание всех рассматриваемых элементов, тогда как в группе 10–20 лет уже заметно значительное превышение от нормы никеля. В группах 20–30 лет и 30–40 лет содержание меди, никеля и кадмия в волосах значительно превышает норму. Содержание свинца по текущим результатам нормы не превысила ни для одной группы исследуемых.

Построены графики зависимости концентрации кадмия, меди, никеля, свинца в волосах работников танталового производства АО «УМЗ» от продолжительности их работы в данном подразделении (см. рисунок).

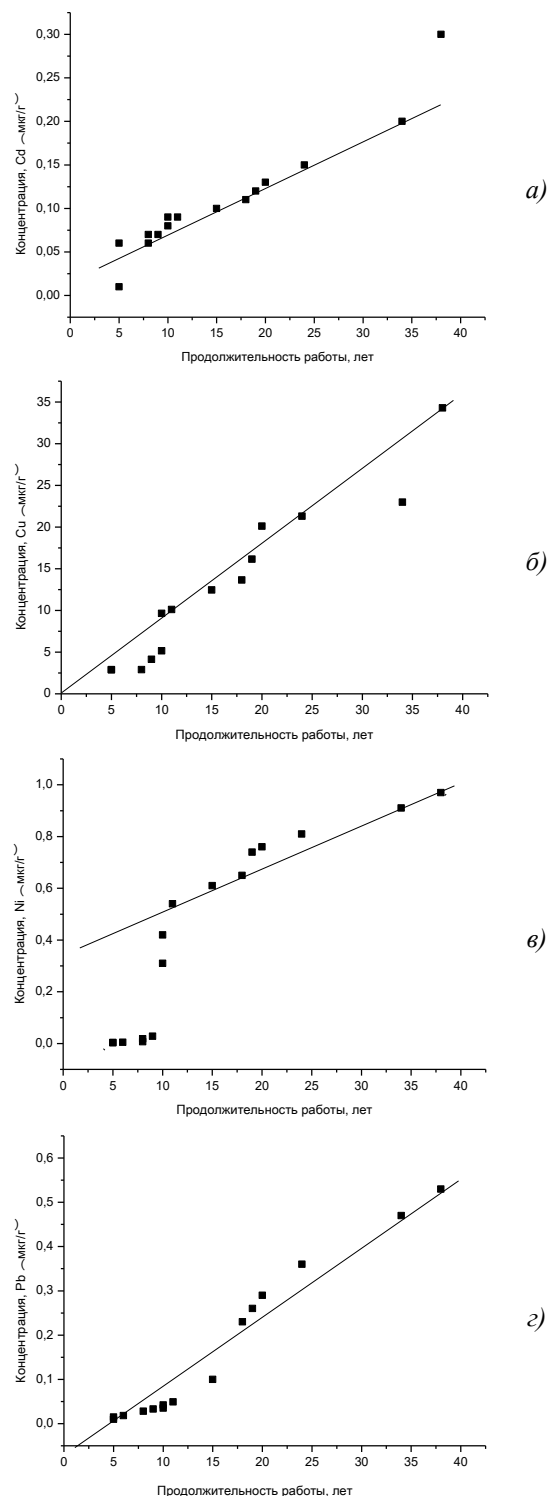


Рисунок. Графики зависимости концентрации кадмия (а), меди (б), никеля (в), свинца (г) от продолжительности работы на танталовом производстве АО «УМЗ»

На всех построенных графиках достаточно четко прослеживается зависимый рост концентрации с увеличением стажа работы на производстве. Отклонения от средних значений, показанных на линии тренда, также могут быть обусловлены различными внутренними факторами (особенности организма, различный возраст и длительность проживания в городе Усть-Каменогорске), так и внешними (нерегулярность и различные объемы выбросов в окружающую среду исследуемых элементов, особенностями распространения загрязняющих веществ и др.).

Таблица 2. Коэффициенты корреляции по зависимости концентрации Cd, Cu, Ni, Pb от продолжительности работы на танталовом производстве

| Элементы | Коэффициент корреляции |
|----------|------------------------|
| Cd       | 0,96                   |
| Cu       | 0,97                   |
| Ni       | 0,89                   |
| Pb       | 0,96                   |

Корреляционный анализ результатов химических испытаний показал прямую зависимость показателей концентрации загрязняющих веществ от стажа работы на данном производстве. Как видно из таблицы 2, прямая зависимость концентрации Cd, Cu, Ni, Pb от продолжительности работы на танталовом производстве АО «УМЗ» подтверждается высокими значениями коэффициента корреляции по каждому исследуемому элементу, что свидетельствует о

сильной корреляционной связи между изучаемыми параметрами.

Однако, стоит отметить, что необходимо провести корреляционный анализ после завершения химических анализов остальных образцов для получения более точного представления о характере и связи этих двух показателей.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По предварительным данным сделан вывод о прямой зависимости концентрации ряда тяжелых металлов от продолжительности работы в непосредственной близости от вредного производства. Необходимо отметить, что данный вывод необходимо дополнительно проверить по завершению проведения химических анализов других образцов, а также планируется рассмотреть комплексное влияние других внешних факторов, таких как продолжительность жизни в г. Усть-Каменогорске (крупном промышленном центре), особенностями накопления отдельных элементов организмом человека и др. Цель работы была достигнута, однако требуется продолжить исследования в данном направлении для подтверждения полученных результатов, выявления факторов загрязнения и их комплексного влияния, проведения сравнений с БД уровнями и определения возможности использования волос в качестве биоиндикаторов загрязнения не только человеческого организма, но и окружающей среды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Crown Copyright © 2015 Published by Elsevier Ltd. All rights reserved. Distribution of uranium, thorium and some stable trace and toxic elements in human hair and nails in Niska Banja Town, a high natural background radiation area of Serbia (Balkan Region, South-East Europe). S.K. Sahoo, Z.S. Zunicb, R. Kritsanuwata, P. Zagrodzki, P. Bossew, N. Veselinovic, S. Mishra, H. Yonehara, S. Tokonami 66 p.
2. Методические указания по спектральным методам определения микроэлементов в объектах окружающей среды и биоматериалах при гигиенических исследованиях. Юдина Т.В., Гильденскиольд Р.С., Егорова М.В., Кагиров В.Н., Анисимова З.А. 20 января 1987 г. N 42-46-87.
3. Dongarra et al., 2011; Gault et al., 2008; Olabanji et al., 2005.
4. Science Direct Journal of Environmental Radioactivity: 145 (2015) 66e77 (Li et al., 2012; Moreda et al., 2007; Rodrigues et al., 2008; Rodushkin and Axelsson, 2000 Samanta et al., 2004; Were et al., 2008).
5. Coelho et al., 2012; Frisch and Schwartz, 2002; Varrica et al., 2014.
6. Изучение содержания тяжелых металлов в волосах работников горно-обогатительного комбината г. Сибай. Семенова И.Н., Рафикова Ю.С. Вестник ОГУ №6/июнь 2009. С. 506–508.
7. Скальная М.Г., Демидов В.А., Скальный А.В. О пределах физиологического (нормального) содержания Ca, Mg, P, Fe, Zn и Cu в волосах человека // Микроэлементы в медицине. 2003. Т. 4, Вып. 2. С. 5–10.

**ӨСКЕМЕН ҚАЛАСЫ ТҰРҒЫНДАРЫНЫҢ ШАШЫНДАҒЫ АУЫР МЕТАЛЛДАР  
МӨЛШЕРІН БАҚЫЛАУ**

<sup>1)</sup> Ж.А. Оспанова, <sup>2)</sup> С.К. Кабдрахманова, <sup>3)</sup> А.В. Троеглазова, <sup>1)</sup> Г.З. Зайнелова,  
<sup>1)</sup> А.В. Павленко, <sup>1)</sup> Е.В. Вноровская

<sup>1)</sup> *С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан Мемлекеттік университеті, Өскемен, Қазақстан*

<sup>2)</sup> *Полимерлі материалдар мен технологиялардың институты, Алматы, Қазақстан*

<sup>3)</sup> *«Қазақ балық шаруашылығы ғылыми-зерттеу институты» ЖШС, Алтай филиалы, Өскемен, Қазақстан*

Адамның шашын қоршаған ортаның улы металлдармен ластану дәрежесінің биоиндикаторы ретінде қарастыруға болады. Бұрынғы зерттеулерге сәйкес, адамның өмір сүру ұзақтығы және оның еңбек өтілі ластану көздеріне жақын жерде ауыр металлдардың концентрациялық деңгейіне тікелей әсер етеді. Шаштағы ауыр металдың мөлшері олардың денедегі басқа да тіндердегі мөлшерін көрсетеді [1]. Ұсынылған зерттеуде «Үлбі металлургия зауыты» АҚ-ның тантал өндірісі жұмысшыларының шаш үлгілері іріктелінді. Зерттеу сыналған әдістемелік нұсқаулықпен жүзеге асырылды [2]. Улы элементтердің (Ni, Cu, Pb, Cd) концентрациясы атомды-абсорбциялық спектроскопия (АҚҰ «Люмэкс», Ресей) көмегімен анықталды. Жұмысшылардың шаш тініндегі улы металлдардың үлесі зиянды тантал өндірісінде жұмыс жасаған уақытына тәуелділігіне алдын ала қорытындылар жасалды.

**CONTROL OF HEAVY METALS CONTENT IN THE HAIR OF THE PEOPLE  
OF THE CITY OF UST-KAMENOGORSK**

<sup>1)</sup> Zh.A. Ospanova, <sup>2)</sup> S.K. Kabdrakhmanova, <sup>3)</sup> A.V. Troeglazova, <sup>1)</sup> G.Z. Zainelova,  
<sup>1)</sup> A.V. Pavlenko, <sup>1)</sup> E.V. Vnorovskaya

<sup>1)</sup> *S. Amanzholov East Kazakhstan State University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan*

<sup>2)</sup> *Institute of Polymer Materials and Technologies, Almaty, Kazakhstan*

<sup>3)</sup> *Altaysky branch of LLP "Kazakh Scientific Research Institute of Fisheries", Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan*

In this article, human hair is regarded as a bio-indicator of the toxic metals pollution degree of the environment. According to earlier studies, it is established that the life expectancy of a person and his work activity directly near the sources of pollution affect the level of heavy metals concentration in his body. The content of heavy metals in hair usually reflects their content in other tissues of the body [1]. In the presented study, hair samples were taken from workers of tantalum production of JSC Ulba Metallurgical Plant. Studies were conducted according to the established method [2]. Concentrations of toxic elements (Ni, Cu, Pb, Cd) were determined with the help of the atomic absorption spectrometer MGA-915 (JSC Lumeks, Russia). Preliminary conclusions are drawn about the dependence of the content of certain toxic elements in the hair tissues of workers on the duration of their labor activity on harmful tantalum production.

УДК 539.23; 539.216.1

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x}$  НАНОТРУБОК<sup>1,2)</sup> Боргеков Д.Б., <sup>1,2)</sup> Козловский А.Л., <sup>1,2)</sup> Здоровец М.В., <sup>1)</sup> Кадыржанов К.К.<sup>1)</sup> Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан<sup>2)</sup> Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

В работе представлены результаты исследования изменения структурных свойств поликристаллических  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x}$  нанотрубок, полученных методом шаблонного синтеза. Исследуемые наноструктуры представляют с высокой степенью поликристалличности  $\text{Fe}_{100-x}\text{Ni}_x$  нанотрубки с объемно-центрированной кубической структурой для  $0 \leq x \leq 0,4$  и с гранецентрированной кубической структурой для  $0,5 \leq x \leq 0,9$ . Установлены механизмы синтеза наноструктур с заданным фазовым составом и кристаллической структурой. Обнаружено, что наименьшей степенью кристалличности обладают  $\text{Fe}_{100}$  наноструктуры, что обусловлено высокой степенью разупорядоченности кристаллической структуры в процессе формирования железных наноструктур при заданных условиях синтеза. Увеличение концентрации никеля приводит к существенному снижению степени разупорядоченности нанотрубок и совершенству кристаллической структуры.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время развитие современной науки и техники дошло до такого уровня, когда появляется необходимость в новых материалах очень малых размеров и со специфическими свойствами. Решением этой проблемы стали бурно развивающиеся в последние годы нанотехнологии. Одним из актуальных вопросов этого направления является синтез наноструктур, которые обладают нехарактерными физико-химическими свойствами. Изменения физико-химических характеристик обусловлено не только уменьшением размеров, но и тем фактом, что на таком уровне начинают играть существенную роль квантово-механические эффекты и волновая природа процессов. Придавая наноматериалам и наносистемам принципиально новые качества, нанотехнология может обеспечить прогресс во многих отраслях современного мира [1–6]. В свою очередь знание магнитных свойств наноматериалов является одной из основных задач в области нанотехнологий. При этом немаловажную роль в изменении физико-химических свойств наноматериалов играют такие факторы, как геометрические характеристики и кристаллическая структура [6]. В связи с чем, в работе представлены результаты исследования влияния фазового состава и кристаллической структуры на магнитные свойства нанотрубок на основе сплава железа-никеля. Выбор материалов на основе железа-никеля обусловлен потенциальным применением наноструктур на их основе в различных приложениях, например, в катализе [7], биомедицине [8], магнитных носителях информации [9].

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Трековые мембраны, использованные в качестве шаблонной матрицы – темплата, были изготовлены из пленок полиэтилентерефталата (ПЭТФ) марки Hostaphan® производства фирмы Mitsubishi Polyester Film (Германия). Пленки облучались на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60 (Астана, Казахстан) ионами криптона с энергией 1,75 МэВ/нуклон и

флюенсом  $4 \cdot 10^7$  ион/см<sup>2</sup> [10]. После облучения полимерные пленки подвергались химическому травлению в течение 210 с в 2,2 М растворе NaOH. Данные условия и время травления позволили получить трековые мембраны с цилиндрическими порами с диаметром  $\sim 380 \pm 10$  нм, не образующими конгломераты скрещенных или слитых пор [11]. Выбор метода электрохимического осаждения обусловлен простотой масштабирования и возможностью управления физико-химическими свойствами синтезируемых наноструктур.

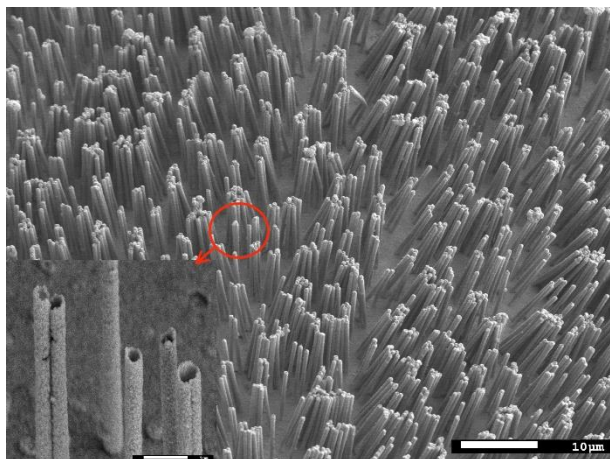
Электрохимическое осаждение в нанопоры ПЭТФ темплата проводилось в потенциостатическом режиме при напряжении 2,0 В. Состав раствора электролита для получения железных и железо-никелевых наноструктур: 7-водные сульфаты железа и никеля –  $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NiSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$  в необходимом молярном соотношении, борная –  $\text{H}_3\text{BO}_3$  и аскорбиновая  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$  кислоты. Все использованные химические реактивы имели чистоту ч.д.а. или х.ч. Контроль за процессом роста наноструктур осуществлялся методом хроноамперометрии с использованием мультиметра Agilent 34410A. Поскольку шаблонная матрица является диэлектриком, для создания проводящего слоя на матрице методом магнетронного напыления в вакууме наносился слой золота толщиной 10 нм, который служил рабочим электродом (катодом) при осаждении. При данных условиях напыления поры в матрице остаются открытыми, что позволило получить наносистемы в форме нанотрубок.

Исследование структурных характеристик и элементного состава нанотрубок проводилось с использованием растрового электронного микроскопа Hitachi TM3030 с системой микроанализа Bruker XFlash MIN SVE при ускоряющем напряжении 15 кВ. Рентгеноструктурный анализ проводился на дифрактометре D8 ADVANCE ECO (Bruker, Германия) при использовании излучения  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1,54060$  Å). Для идентификации фаз и исследования кри-

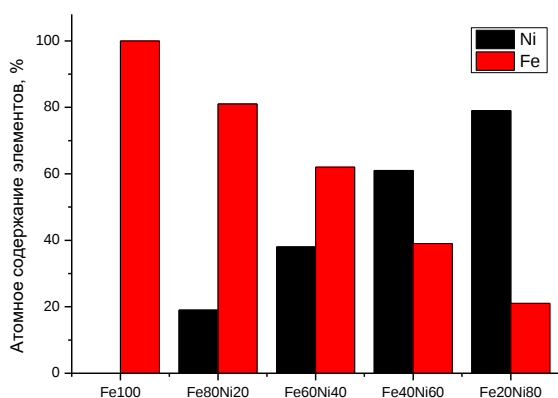
сталлической структуры использовалось программное обеспечение BrukerAXSDIFFRAC.EVA v.4.2 и международная база данных ICDD PDF-2.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для изучения морфологии синтезированных нанотрубок была применена растровая электронная микроскопия. На рисунке 1, а представлены растровые электронные изображения синтезированных наноструктур. Для определения элементного состава были применены методы энергодисперсионного анализа.



а)



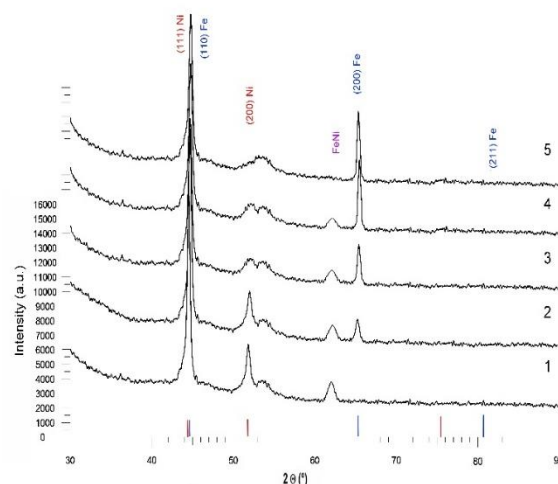
б)

Рисунок 1. РЭМ изображения синтезированных нанотрубок (а) и диаграмма атомного содержания элементов в наноструктурах (б)

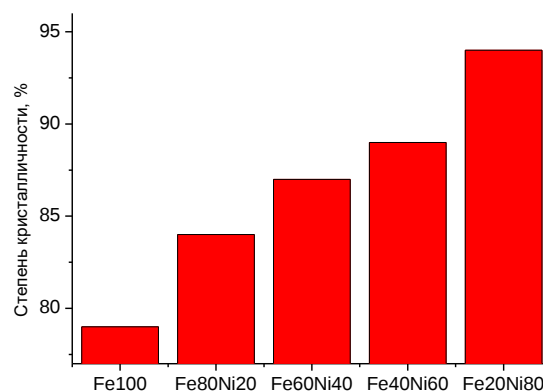
На рисунке 1, б представлены данные элементного состава. Достоверность результатов подтверждалась снятием спектров с пяти точек по поверхности исследуемого образца, а также снятием карт распределения элементов в структуре при помощи метода картирования. Как видно из представленных данных, атомное соотношение компонент в синтезированных образцах соответствует весовому соотношению компонент электролита, используемого для синтеза. Таким образом, применение метода электрохимического осаждения при заданных условиях

позволяет получать полые наноструктуры с заданными геометрическими свойствами и контролируемым атомным соотношением.

Для определения влияния условий осаждения на кристаллическую структуру был проведен рентгеноструктурного анализа синтезированных образцов при различных условиях синтеза. На рисунке 2, а представлены рентгеновские дифрактограммы синтезированных образцов.



а)



б)

Рисунок 2. Рентгеновские дифрактограммы исследуемых образцов: 1 -  $\text{Fe}_{21}\text{Ni}_{79}$ ; 2 -  $\text{Fe}_{39}\text{Ni}_{61}$ ; 3 -  $\text{Fe}_{62}\text{Ni}_{38}$ ; 4 -  $\text{Fe}_{81}\text{Ni}_{19}$ ; 5 -  $\text{Fe}_{100}\text{Ni}_0$  (а) и диаграмма зависимости изменения степени кристалличности от фазового состава нанотрубок (б)

Анализ дифрактограмм показал следующее: при концентрации железа 80 и 60 % в структуре нанотрубок преобладает ОЦК фаза, при этом с увеличением концентрации железа наблюдается увеличение параметра кристаллической решетки с 2,8794 для  $\text{Fe}_{80}\text{Ni}_{20}$  до 2,8854 для  $\text{Fe}_{60}\text{Ni}_{40}$ . При этом для образца  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{60}$  наблюдается наиболее интенсивный пик характерный для соединения  $\text{FeNi}_3$  с индексами Миллера (111) с параметром ячейки 3,5131. Для образца  $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$  в кристаллической структуре наблюдается

преобладание ГЦК фазы никеля с параметром элементарной ячейки 3,5695. При аппроксимации линий на дифрактограмме необходимым числом симметричных функций псевдо-Фойгта была определена ширина зарегистрированных линий FWHM, которая позволила охарактеризовать совершенство кристаллической структуры и оценить степень кристалличности. Согласно представленным данным на диаграмме (рисунок 2, б) видно, что с увеличением концентрации никеля в структуре увеличивается степень кристалличности, а также меняются основные характеристики кристаллической структуры: параметр элементарной ячейки, средний размер кристаллитов, текстурные коэффициенты. В результате обработки полученных рентгеновских дифрактограмм были определены параметры элементарной ячейки для исследуемых образцов. Расчет параметра кристаллической решетки проводился с использованием экстраполяционной функции Нельсона – Тейлора:

$$a = f \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\cos^2 \theta}{\sin \theta} + \frac{\cos \theta}{\theta} \right) \right]. \quad (1)$$

Значение и погрешность определения параметра  $a$  определены путем линейной экстраполяции этой функции к нулевому значению аргумента ( $\theta = 90^\circ$ ). Средний размер кристаллитов по уравнению Шерера:

$$\tau = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2)$$

где  $k = 0,9$  – безразмерный коэффициент формы частиц (постоянная Шерера),  $\lambda = 1,54060 \text{ \AA}$  – длина волны рентгеновского излучения,  $\beta$  – полуширина рефлекса на полувысоте (FWHM),  $\theta$  – угол дифракции (угол Брегга). Результаты расчетов основных параметров кристаллической структуры представлены в таблице 1.

Таблица 1. Данные кристаллической структуры синтезированных нанотрубок

|                                   | a, Å   | L, nm | Фазовое содержание |     |      | Атомное соотношение, % |     |
|-----------------------------------|--------|-------|--------------------|-----|------|------------------------|-----|
|                                   |        |       | Ni                 | Fe  | FeNi | Ni                     | Fe  |
| Fe <sub>100</sub>                 | 2,8627 | 21    | 0                  | 100 | 0    | 0                      | 100 |
| Fe <sub>80</sub> Ni <sub>20</sub> | 2,8794 | 19    | 5                  | 82  | 13   | 19                     | 81  |
| Fe <sub>60</sub> Ni <sub>40</sub> | 2,8854 | 18    | 26                 | 59  | 15   | 38                     | 62  |
| Fe <sub>40</sub> Ni <sub>60</sub> | 3,5131 | 15    | 37                 | 45  | 18   | 61                     | 39  |
| Fe <sub>20</sub> Ni <sub>80</sub> | 3,5695 | 13    | 68                 | 7   | 25   | 79                     | 21  |

Согласно представленным данным изменения среднего размера кристаллитов в таблице 1, можно сделать следующий вывод: увеличение концентрации Ni в кристаллической структуре нанотрубок приводит к уменьшению среднего размера кристаллитов. Изменение интенсивности и формы дифракционных пиков может быть обусловлено несовер-

шенством кристаллической структуры, а также дефектами, сформировавшимися в процессе синтеза нанотрубок. Наличие в структуре дефектов первого рода (точечные дефекты, дислокационные петли, частицы новой фазы) приводит к смещению дифракционных максимумов, но при этом не оказывает влияние на уширение дифракционных линий. Дефекты второго рода (дислокации, скопление дефектов) вызывают уширение дифракционных линий. Физическое уширение  $\beta$  (FWHM) характеризующее величину неоднородной упругой деформации  $\Delta a/a$  определялось согласно формуле:

$$\beta = \frac{\Delta a}{a} \operatorname{tg} \theta, \quad (3)$$

Наличие в кристаллической структуре микронапряжений и их влияние на искажение кристаллической структуры определялось по формулам:

$$K = \frac{\beta_{200}}{\beta_{110}}, \quad (4)$$

$$\frac{\sin \theta_{200}}{\sin \theta_{110}} \leq K \leq \frac{\operatorname{tg} \theta_{200}}{\operatorname{tg} \theta_{110}}. \quad (5)$$

Согласно теории кристаллографии, уширение дифракционных линий обусловлено двумя факторами: 1) уменьшением среднего размера кристаллитов; 2) увеличением количества микронапряжений в кристаллической структуре. При этом на количество микронапряжений и изменение среднего размера кристаллитов оказывает влияние изменение элементного состава нанотрубок, геометрия структуры. В таблице 2 представлены результаты изменения микронапряжений в структуре нанотрубок в зависимости от элементного состава.

Таблица 2. Изменения микронапряжений в структуре

| Состав нанотрубок Fe <sub>x</sub> Co <sub>100-x</sub> | $\frac{\sin \theta_{200}}{\sin \theta_{110}}$ | $\frac{\operatorname{tg} \theta_{200}}{\operatorname{tg} \theta_{110}}$ | K    |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------|
| Fe <sub>100</sub>                                     | 3,44                                          | 4,48                                                                    | 4,21 |
| Fe <sub>80</sub> Co <sub>20</sub>                     | 3,42                                          | 4,47                                                                    | 4,19 |
| Fe <sub>60</sub> Co <sub>40</sub>                     | 3,43                                          | 4,47                                                                    | 4,01 |
| Fe <sub>40</sub> Co <sub>60</sub>                     | 3,46                                          | 4,49                                                                    | 3,96 |
| Fe <sub>20</sub> Co <sub>80</sub>                     | 3,42                                          | 4,48                                                                    | 3,93 |

Согласно полученным данным расчета  $K$  видно, что на изменение формы дифракционных пиков оказывают влияние оба фактора. В процессе синтеза нанотрубок с увеличением концентрации железа в кристаллической структуре образуется большое количество дефектов, обусловленное разницей между диаметрами радиусов атомов железа и никеля. В свою очередь увеличение концентрации никеля в структуре приводит к появлению дополнительной фазы FeNi<sub>3</sub>.

Определение динамики изменения текстурных плоскостей и ориентации нанотрубок в результате

облучения проводилось посредством расчета текстурных коэффициентов при помощи уравнения Харриса:

$$TC_{hkl} = \frac{I_{hkl}}{I_{0hkl}} / \frac{1}{n} \sum \frac{I_{hkl}}{I_{0hkl}}, \quad (6)$$

где  $I_{hkl}$  – экспериментально полученная интенсивность рефлекса,  $I_{0hkl}$  – соответствующая интенсивность согласно базе JCPDS,  $n$  – количество рефлексов. Результаты расчетов приведены в таблице 3.

Таблица 3. Данные изменения фазового состояния и текстурных коэффициентов

|                                   | $T_{hkl}$ |        |        |        |     | FeNi   |
|-----------------------------------|-----------|--------|--------|--------|-----|--------|
|                                   | Ni        |        | Fe     |        |     |        |
|                                   | 111       | 200    | 110    | 200    | 211 |        |
| Fe <sub>100</sub>                 | –         | –      | 1,5631 | 0,4369 | –   | –      |
| Fe <sub>80</sub> Ni <sub>20</sub> | 0,2313    | –      | 1,3451 | 0,4236 | –   | 0,2131 |
| Fe <sub>60</sub> Ni <sub>40</sub> | 0,5632    | 0,3511 | 1,2414 | 0,3414 | –   | 0,3234 |
| Fe <sub>40</sub> Ni <sub>60</sub> | 1,2314    | 0,4515 | 1,0515 | 0,2351 | –   | 0,4521 |
| Fe <sub>20</sub> Ni <sub>80</sub> | 1,5641    | 0,7832 | 0,5356 | –      | –   | 0,5625 |

Текстурные коэффициенты больше единицы указывают на преимущественную ориентацию массива нанотрубок вдоль соответствующих направлений, что предполагает увеличение числа зерен вдоль этих направлений. Число отражений ( $n$ ) соответствует

максимальному значению текстурных коэффициентов. Как видно из представленных данных, с увеличением концентрации содержания никеля в структуре наблюдается перестройка кристаллической структуры с преобладанием текстурной плоскости (111), характерной для никеля.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полые наноструктуры на основе сплава Fe<sub>x</sub>Ni<sub>100-x</sub> были синтезированы в порах полимерных темплатных матриц на основе ПЭТФ с применением метода электрохимического осаждения. Обнаружена зависимость изменения структурных свойств от атомного содержания компонент в структуре нанотрубок. Установлено, что синтезированные наноструктуры представляют с высокой степенью поликристалличности Fe<sub>100-x</sub>Ni<sub>x</sub> нанотрубки с ОЦК структурой для  $0 \leq x \leq 0,4$  и с ГЦК структурой для  $0,5 \leq x \leq 0,9$ , при этом увеличение концентрации Ni в кристаллической структуре нанотрубок приводит к уменьшению среднего размера кристаллитов и изменению текстурных коэффициентов, а также к формированию в структуре дополнительной фазы FeNi<sub>3</sub>.

*Работа выполнена в рамках Грантового финансирования МОН РК по договору №132 от 12 марта 2018 года.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Zhou D. et al. Template synthesis and magnetic behavior of FeNi alloy nanotube arrays //Chinese Journal of Chemical Physics. – 2007. – V. 20. – №. 6. – P. 821.
2. Lv R. et al. Effect of using chlorine-containing precursors in the synthesis of FeNi-filled carbon nanotubes //Carbon. – 2007. – V. 45. – №. 7. – P. 1433–1438.
3. Xue S. et al. Electrochemically synthesized binary alloy FeNi nanorod and nanotube arrays in polycarbonate membranes //Thin Solid Films. – 2009. – V. 517. – №. 20. – P. 5922–5926.
4. Chen X. H. et al. The formation conditions of carbon nanotubes array based on FeNi alloy island films //Thin Solid Films. – 1999. – V. 339. – №. 1-2. – P. 6–9.
5. Wen F. et al. Microwave absorption properties of multiwalled carbon nanotube/FeNi nanopowders as light-weight microwave absorbers //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2013. – V. 343. – P. 281–285.
6. Yang Q. et al. Microstructure, electrical conductivity and microwave absorption properties of  $\gamma$ -FeNi decorated carbon nanotube composites //Composites Part B: Engineering. – 2016. – V. 87. – P. 256–262.
7. Wu H. et al. Synthesis and magnetic properties of size-controlled FeNi alloy nanoparticles attached on multiwalled carbon nanotubes //Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2010. – V. 71. – №. 3. – P. 290–295.
8. Jiang W. et al. Magnetic properties and thermodynamics in a metallic nanotube //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2014. – V. 355. – P. 309–318.
9. Tang X. et al. Halloysite-nanotubes supported FeNi alloy nanoparticles for catalytic decomposition of toxic phosphine gas into yellow phosphorus and hydrogen //Chemosphere. – 2013. – V. 91. – №. 9. – P. 1368–1373.
10. Zdorovets M. et al. Accelerator complex based on DC-60 cyclotron //Proc. 24th Russian Particle Accelerator Conf. – 2014. – P. 287–289.
11. Kaniukov E. Y. et al. Evolution of the polyethylene terephthalate track membranes parameters at the etching process //Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences). – 2017. – V. 52. – №. 2. – P. 155–160.

# **$\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x}$ НАНОТҮТІКТЕРІНІҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ**

<sup>1,2)</sup> Д.Б. Боргеков, <sup>1,2)</sup> А.Л. Козловский, <sup>1,2)</sup> М.В. Здоровец, <sup>1)</sup> К.К. Кадыржанов

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

<sup>2)</sup> *Ядролық физика институтының, Алматы, Қазақстан*

Бұл жұмыста үлгілі синтез әдісімен алынған, поликристалды  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x}$  нанотүтіктерінің құрылымдық қасиеттерінің өзгерісін зерттеудің нәтижелері көрсетілген. Зерттеліп отырған  $\text{Fe}_{100-x}\text{Ni}_x$  нанотүтіктер көлемдік кубтық центрілген құрылым үшін  $0 \leq x \leq 0.4$  және қырлық кубтық центрілген құрылым үшін  $0.5 \leq x \leq 0.9$  жоғары дәрежелі поликристалды наноқұрылымдар болып табылады. Арнайы фазалық құрамы мен кристалдық құрылымы бар наноқұрылымдарды синтездеу механизмдері анықталды.  $\text{Fe}_{100}$  наноқұрылымдары ең төменгі кристаллиттік дәрежесіне ие екендігі анықталды, бұл берілген синтез жағдайында темір наноқұрылымдарын қалыптастыру кезінде кристалды құрылымның бұзылуының жоғары дәрежесіне байланысты. Никель концентрациясының жоғарылауы нанотүтіктердің бұзылу дәрежесін айтарлықтай төмендетуге және кристалдық құрылымды жетілдіруге әкеледі.

## **INVESTIGATION OF STRUCTURAL PROPERTIES OF $\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x}$ NANOTUBES**

<sup>1,2)</sup> D.B. Borgekov, <sup>1,2)</sup> A.L. Kozlovskiy, <sup>1,2)</sup> M.V. Zdorovets, <sup>1)</sup> K.K. Kadyrzhanov

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

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

The paper presents the results of studying the structural properties of polycrystalline  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x}$  nanotubes obtained by the template synthesis method. The nanostructures represent nanotubes with a high degree of polycrystallinity of  $\text{Fe}_{100-x}\text{Ni}_x$  with a body-centered cubic structure for  $0 \leq x \leq 0.4$ , and with face-centered cubic structure for  $0.5 \leq x \leq 0.9$ . Mechanisms for the synthesis of nanostructures with a specified phase composition and crystal structure have been established. It was found that  $\text{Fe}_{100}$  nanostructures possess the lowest degree of crystallinity, which is caused by a high degree of disorder of the crystal structure during the formation of iron nanostructures under given synthesis conditions. An increase in the concentration of nickel leads to a substantial decrease in the degree of disorder of the nanotubes and to the perfection of the crystal structure.

УДК: 621.039.51

## АНАЛИЗ ПРОЕКТНОЙ АВАРИИ НА РЕАКТОРЕ ИВГ.1М С ВЫБРОСОМ РАБОЧЕГО ОРГАНА СУЗ

Мартыненко Е.А., Гановичев Д.А., Акаев А.С., Хажидинов А.С., Жагипарова Л.К.

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

В статье представлен анализ теплового состояния ТВС с топливом низкого обогащения реактора ИВГ.1М при проектных авариях, связанных со сбоями системы управления и защиты. Рассмотрены аварийные ситуации с самопроизвольным разворотом одного регулирующего барабана, а также системы регулирующих барабанов с максимальной эффективностью.

Задача исследований, приведенных в статье, заключалась в проведении нестационарного теплового расчета ТВС реактора с двойным профилированием энерговыделения по высоте сборки и во времени.

В результате расчетных исследований получены диаграммы изменения максимальных значений температуры ТВЭЛов и воды на выходе из водоохлаждаемого технологического канала, при проектных авариях с выбросом рабочего органа системы управления и защиты.

**ВВЕДЕНИЕ**

Реактор ИВГ.1М является исследовательским водо-водяным гетерогенным корпусным ядерным реактором на тепловых нейтронах с легководяными теплоносителем и замедлителем и бериллиевым отражателем нейтронов. Активная зона реактора содержит 30 водоохлаждаемых технологических каналов. В центральной ячейке реактора расположен окруженный бериллиевым вытеснителем петлевой канал, в который возможна установка экспериментального устройства. Система регулирования реактора ИВГ.1М включает 10 вращающихся регулирующих барабанов с поглощающими элементами.

Международным агентством по атомной энергии было принято решение отказаться от использования во всех типах реакторов ядерного топлива, которое может быть использовано для создания ядерного оружия. Было установлено минимальное обогащение топлива, при котором оно считается «безопасным» – менее 20 % по  $U^{235}$ . Топливо реактора ИВГ.1М имеет обогащение 90 %. Следовательно, конверсия активной зоны ИР ИВГ.1М является необходимым процессом.

В связи с проведением работ по конверсии реактора ИВГ.1М на низкообогащенное топливо возникает необходимость проведения анализа безопасности новой конверсионной активной зоны. В результате расчетных исследований рассмотрены проектные аварии на реакторе ИВГ.1М, связанные со сбоями системы управления и защиты, получены диаграммы изменения максимальных значений температуры ТВЭЛов и воды на выходе из водоохлаждаемого технологического канала, при проектных авариях, связанных с выбросом рабочего органа системы управления и защиты (СУЗ) с максимальной эффективностью.

**ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ**

Под выбросом рабочего органа СУЗ, приводящим к нерегламентированному изменению реактивности в реакторе ИВГ.1М, понимаются следующие ситуации:

- самопроизвольный разворот одного регулирующего барабана из критического положения (угол поворота  $80^{\circ}$ – $90^{\circ}$ ) с максимально возможной скоростью 50 шагов/с (для одного барабана);

- самопроизвольный разворот системы регулирующих барабанов с технически максимально возможной скоростью до 500 шагов/с (разворот 10 барабанов).

Для проведения расчета принято следующее начальное состояние реактора перед началом развития аварийной ситуации:

- мощность реактора 10 МВт;
- расход теплоносителя через реактор 62,5 кг/с [1];

- давление в системе (сохраняется в течение всей аварийной ситуации) 1 МПа;

- температура воды на входе в реактор в штатном режиме 323 К (допустимое значение температуры воды) [2];

- расход воды через канал был принят постоянным, равным 2 кг/с (среднее значение по каналам);

- в качестве начального положения системы РБ для исходного события с разворотом одного регулирующего барабана принято 2500 шагов, для аварийной ситуации с разворотом десяти регулирующих барабанов – 2000 шагов. При таких положениях дифференциальная регулировочная характеристика системы РБ имеет максимум.

Аварийная защита реактора сработает при следующих уставках аварийной защиты:

- реактивность реактора превышает 0,4  $\beta_{эфф}$ ;
- мощность реактора превышает заданную мощность на 20 %;

- период реактора станет меньше 10 с.

Характеристики срабатывания аварийной защиты:

- задержка времени срабатывания аварийной защиты – 0,3 с;

- скорость разворота системы РБ –  $120^{\circ}$  с $^{-1}$ .

Самопроизвольный разворот одного барабана из критического положения (угол поворота  $80^{\circ}$ – $90^{\circ}$ ) с

максимально возможной скоростью 50 шагов/с (для одного барабана) приводит к росту положительной реактивности со скоростью 0,19  $\beta\text{эф}/\text{с}$  максимально до значения 0,06  $\beta\text{эф}$  [3].

Сигнал на аварийную защиту поступит через 0,02 с после самопроизвольного разворота барабана вследствие снижения периода реактора до величины менее 10 с. С учетом задержки, аварийная защита сработает через 0,32 с после начала исходного события, и развитие аварии прекратится.

Самопроизвольный разворот 10 регулирующих барабанов с технически максимально возможной скоростью 500 шагов/с приводит к росту положительной реактивности со скоростью 0,19  $\beta\text{эф}/\text{с}$  до значения 0,5  $\beta\text{эф}$ , при этом мощность реактора кратковременно увеличивается практически в 2 раза.

Как и в предыдущем случае, в результате снижения периода реактора менее 10 с аварийная защита сработает через 0,32 с после начала самопроизвольного разворота барабанов, и развитие аварийной ситуации прекратится, мощность снизится.

#### РАСЧЕТ

Теплофизические расчеты проведены при использовании программы ANSYS Fluent. Расчетная модель имеет форму треугольной призмы. В расчетной модели ТВЭЛы представлены в виде цилиндра. Таким образом, расчетная модель имитирует треугольный сектор решетки ТВС высотой 0,8 м. На рисунке 1 приведен участок конечно-элементной сетки расчетной модели.

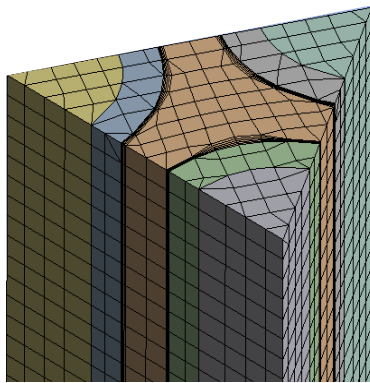


Рисунок 1. Участок конечно-элементной сетки расчетной модели

Расчетная модель была верифицирована по результатам экспериментов, отклонения расчетных и экспериментальных данных составили ~4 %.

Расчет выполнен при следующих принятых допущениях:

- профиль энерговыделения по высоте ТВЭЛов является неизменным;
- теплообмен внутри элементов модели осуществляется за счет теплопроводности;
- на наружной границе элементов модели теплообмен с теплоносителем происходит за счет конвекции.

В расчете задано двойное профилирование энерговыделения по высоте сборки и во времени.

Для определения параметров перед развитием аварии моделируется работа реактора на постоянной мощности до установления стационарного теплового состояния (500 секунд). После этого в расчете учитывается влияние на мощность реактора эффектов реактивности (в зависимости от изменения температуры элементов активной зоны) и положения органов СУЗ. В течение 10 секунд реактор работает на номинальном режиме. Затем на 510 секунде моделируется соответствующее аварийное событие с выбросом органов СУЗ.

Расчет значений температуры воды и ТВЭЛов был проведен для одного канала по полученной расчетным путем диаграмме мощности. Расчет температурного поля в канале выполнен для профиля энерговыделения наиболее напряженного канала 1-го ряда.

Изменение мощности реактора во времени при возникновении аварийных событий, а также распределение энерговыделения по высоте ТВС взято по данным нейтронно-физических расчетов [3, 4].

Теплофизические свойства материалов, используемые при проведении расчета, взяты из справочной литературы [5, 6]

#### АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рисунке 2 представлен график изменения значений максимальной температуры ТВЭЛов и воды на выходе ВОРТ в случае аварийной ситуации, связанной с самопроизвольным разворотом одного регулирующего барабана.

Как видно из графика, максимальное значение температуры внутри ТВЭЛов, через 0,34 секунды, после разворота регулирующих органов в крайнее положение, не превысит 421 К. При этом, максимальное значение температуры воды будет достигнуто через 0,47 секунды с момента начала развития аварийной ситуации и составит 366 К. Кипения воды при развитии рассматриваемой аварийной ситуации не произойдет.

На рисунке 3 представлен график изменения значений максимальной температуры ТВЭЛов и воды во времени в случае аварийной ситуации, связанной с самопроизвольным разворотом системы регулирующих барабанов.

Максимальное значение температуры в центре ТВЭЛов достигнет 440 К через 0,35 секунды после разворота регулирующих органов в крайнее положение. Максимум температуры воды достигнет значения 372 К через 0,51 секунды с момента начала развития аварийной ситуации. Вскипания воды при развитии рассматриваемой аварийной ситуации не произойдет.

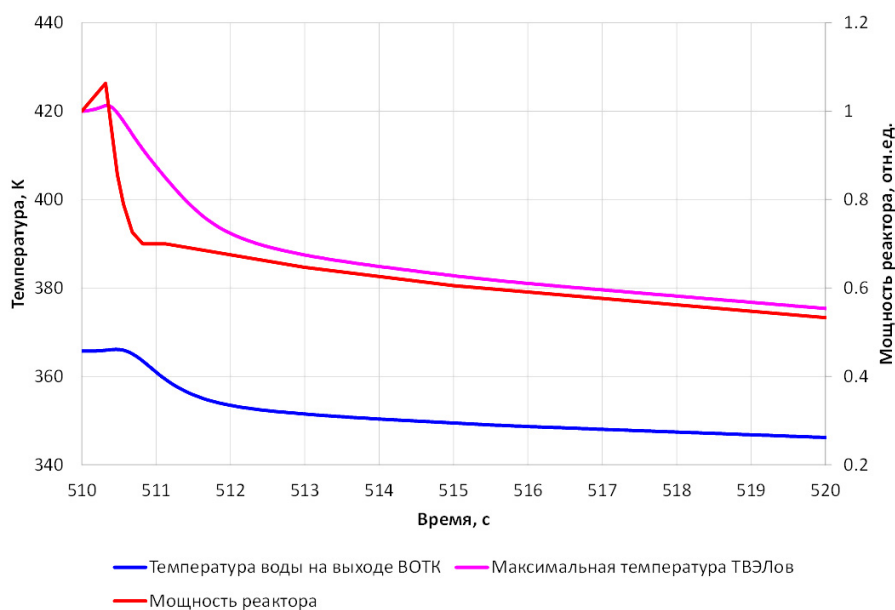


Рисунок 2. Диаграмма изменения максимальных значений температуры ТВЭЛов и воды на выходе ВОТК

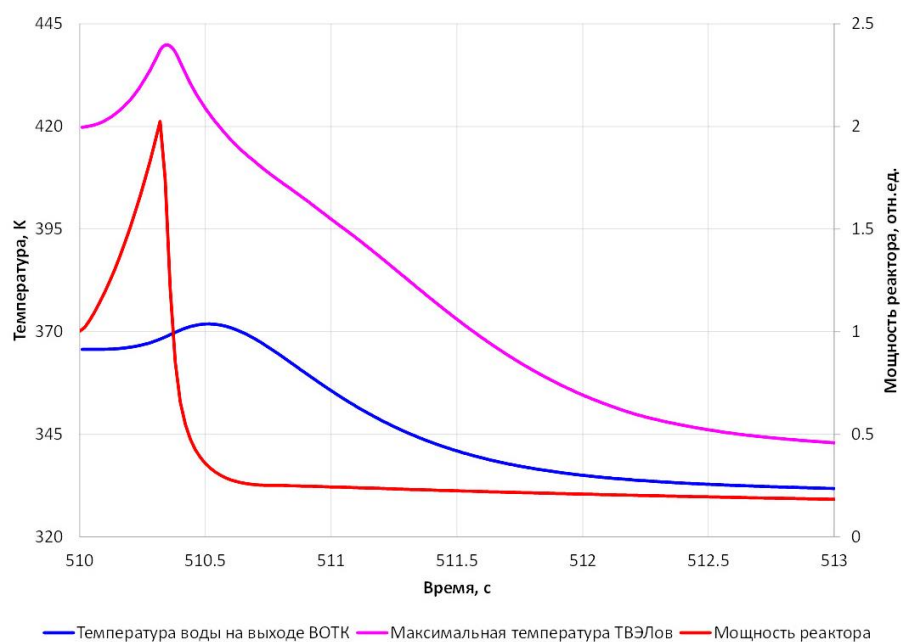


Рисунок 3. Диаграмма изменения максимальных значений температуры ТВЭЛов и воды на выходе ВОТК

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных теплофизических исследований получены диаграммы изменения максимальных значений температуры ТВЭЛов и воды на выходе из ВОТК-НОУ при аварийных ситуациях, связанных с самопроизвольным разворотом одного регулирующего барабана и 10 барабанов системы управления и защиты.

Результаты тепловых расчетов показывают, что в ситуациях, связанных с выбросом рабочего органа

СУЗ, значения температуры воды и ТВЭЛов незначительно превысят предельные значения, допустимые при нормальной эксплуатации; кипения воды в трактах не произойдет. В результате срабатывания аварийной защиты аварийные ситуации локализуются без каких-либо последствий для активной зоны реактора. Результаты расчетов будут использованы в отчете по анализу безопасности реактора ИВГ.1М с топливом низкого обогащения.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Руководство по эксплуатации «Водяные системы реактора ИВГ.1М» (АК.65000.01.187) / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК – Курчатов, 2012. – 30 с.
- 2 Комплекс научно-исследовательских реакторов «БАЙКАЛ-1». Реакторная установка ИВГ.1М: отчет по обоснованию безопасности: АК.65000.00.796Д / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК. – Курчатов, 2002 г.
- 3 Расчет эффектов реактивности ИВГ.1М с топливом низкого обогащения: техническая справка / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК А.В. Пахниц, Р.А. Иркимбеков, Л.К. Жагипарова – Курчатов, 2017. – 13 с. № 11-220-02 / 616 вн. от 17.04.2017.
- 4 Расчет энерговыделения реактора ИВГ.1М с ВОТК-НОУ №69вн/11-220-02 от 10.01.2017 г.
- 5 Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М., Энергия, 1977, 336 с.
- 6 Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. – М., Атомиздат, 1968, 474 с.

## ИВГ.1М РЕАКТОРЫНДА БҚЖ ЖҰМЫС БӨЛІКТЕРІНІҢ ШЫҒАРЫНДЫСЫ БАР ЖОБАЛЫҚ АПАТТЫ ТАЛДАУ

Е.А. Мартыненко, Д.А. Гановичев, А.С. Акаев, А.С. Хажидинов, Л.К. Жагипарова

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

Мақалада басқару және қорғау жүйесінің іркілістеріне байланысты жобалық апаттарда ИВГ.1М реактордың төмен байыту отынымен ЖШЖ жылу жағдайын талдау ұсынылды. Бір реттеу барабанының өздігінен пайда болатын айналымда апаттық жағдайлар және де максимальды тиімділікпен реттеу барабандарының жүйелері қарастырылды.

Мақалада келтірілген зерттеулердің міндеті, құрастыру бойынша және уақыт бойынша энергия бөлінудің қос қалыпқа келтірумен реактордың ЖШЖ стандартты емес жылу есебін жүргізуде болады.

Есептік зерттеулер нәтижесінде басқару және қорғау жүйесінің жұмыс бөліктерінің шығындылары бар жобалық апаттар кезінде суды салқындататын технологиялық каналдан шығу суы және ТВЭЛ-дер температурасының максимальды мағыналарының өзгерту диаграммалары алынды.

## ANALYSIS OF DESIGN ACCIDENT AT THE IVG.1M REACTOR WITH EJECTION OF ACTUATING DEVICE OF CONTROL AND PROTECTION SYSTEM

Ye.A. Martynenko, D.A. Ganovichev, A.S. Akayev, A.S. Khazhidinov, L.K. Zhagiparova

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

The paper presents analysis of thermal condition of a fuel assembly (FA) with low-enriched uranium (LEU) fuel of the IVG.1M reactor at design accidents due to failure of control and protection system (CPS). The accidents with spontaneous turning of one control drum as well as drum control system with peak efficiency were considered.

The issue of research presented in the article was in conduction of nonsteady heat computation of reactor's FA with double profiling of energy release throughout the height of the assembly and in time.

Based on results of the computation research, charts of changes of temperature peak values of FAs and water at the outlet from water-cooled technological channel at design accidents with ejection of CPS actuating device were obtained.

УДК 621.6

## РЕАКТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ВОДООХЛАЖДАЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КАНАЛОВ С ТОПЛИВОМ НИЗКОГО ОБОГАЩЕНИЯ В РАМКАХ КОНВЕРСИИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ИВГ.1М

Скаков М.К., Вурим А.Д., Гныря В.С., Азимханов А.С., Колбаенков А.Н., Дербышев И.К., Нуржанов Е.Б.

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

На исследовательском реакторе ИВГ.1М проводятся реакторные испытания экспериментальных водоохлаждаемых технологических каналов с низкообогащенным урановым топливом с целью определения соответствия каналов предъявляемым техническим требованиям и получения экспериментальных данных, необходимых для принятия решения об изготовлении партии штатных каналов и комплектации ими активной зоны реактора по результатам испытаний и исследований.

В данной статье приведены результаты сравнительной оценки технологических параметров (расход, давление, температура) во время проведения реакторных испытаний экспериментальных водоохлаждаемых технологических каналов с низкообогащенным урановым топливом и результаты расчета выгорания  $U^{235}$  в экспериментальных водоохлаждаемых технологических каналах с низкообогащенным урановым топливом по реализованным пускам исследовательского реактора ИВГ.1М.

### ВВЕДЕНИЕ

20 июля 2010 года между Национальным ядерным центром Республики Казахстан и Аргонской национальной лабораторией Соединённых штатов Америки было подписано соглашение на основе которого исследуется возможность конверсии реактора ИВГ.1М с высокообогащённого уранового топлива (90 % обогащение по  $U^{235}$ ) на низкообогащенное (до 20 % обогащение по  $U^{235}$ ).

Снижение обогащения топлива реактора ИВГ.1М нацелено на выполнение международных программ по минимизации использования высокообогащенного урана и снижения риска незаконного распространения делящихся ядерных материалов, которые могут быть использованы для создания оружия массового уничтожения. В случае успешной конверсии будет обеспечена возможность полноценной эксплуатации реактора ИВГ.1М в течение многих последующих лет.

На начальном этапе исследований были выполнены аналитические исследования, которые включали в себя предварительные и уточненные расчетные оценки нейтронно-физических и теплогидравлических параметров реактора ИВГ.1М с топливом низкого обогащения в стационарных и переходных режимах эксплуатации реактора. Результаты расчетов показали, что существуют варианты конверсии, в результате реализации которых эксплуатационные и экспериментальные возможности исследовательского реактора ИВГ.1М сохраняются.

Предприятие ФГУП «НИИ НПО «Луч» (г. Подольск, РФ), которое является создателем ныне эксплуатируемой активной зоны исследовательского реактора ИВГ.1М с водоохлаждаемыми технологическими каналами с высокообогащённым урановым топливом (ВОТК-ВОУ), было привлечено к работам по разработке и изготовлению ВОТК для реактора с низкообогащенной активной зоной. В целях экспе-

риментальной проверки эксплуатационных характеристик нового топлива ФГУП «НИИ НПО «Луч» изготовило два экспериментальных водоохлаждаемых технологических канала с топливом низкообогащённым урановым топливом (ВОТК-НОУ), при этом замена всех ВОТК активной зоны будет произведена только после получения положительных результатов испытаний.

В отношении экспериментальных ВОТК-НОУ были выполнены процедуры входного контроля, проведены предреакторные испытания, в том числе – испытания на проходимость через калибр, гидравлические испытания по определению расходных характеристик и испытания на плотность. По результатам большого комплекса работ экспериментальные ВОТК-НОУ были признаны пригодными к установке в активную зону исследовательского реактора для проведения внутриреакторных испытаний.

### 1 ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ

ВОТК-НОУ (см. рисунок 1) выполнен в виде цилиндрической капсулы со ступенчатой наружной поверхностью общей длиной 4990 мм и с внешним диаметром на уровне активной зоны, равным 76 мм, с максимальным диаметром, равным 82 мм (в районе шарикового замка) и с минимальным диаметром (в районе нижнего торца ВОТК), равным 44 мм.

Крепление ВОТК-НОУ в реакторе осуществляется шариковым замком 19, расположенным на входном участке хвостовика 3 ВОТК-НОУ. Центровка ВОТК-НОУ в реакторе осуществляется с помощью двух посадочных поясов.

Для охлаждения конструктивных элементов реактора, а также в качестве теплоносителя в ВОТК-НОУ применяется вода. Вода из реактора через окна направляющей головки 2 поступает в ВОТК-НОУ, проходит ТВС 4, омывает пробку 22 биозащиты, проходит хвостовик 3 и через торец ВОТК-НОУ выходит в узел отвода воды.

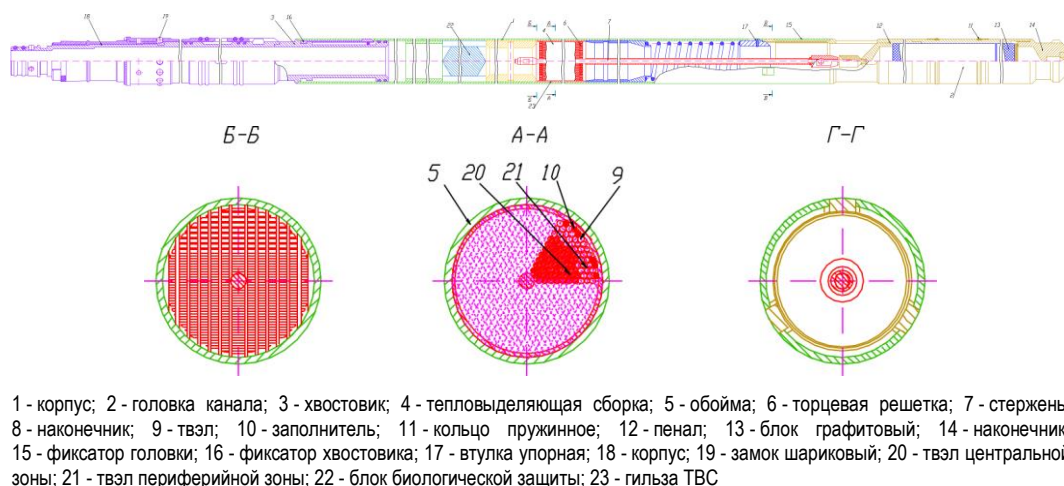


Рисунок 1. Конструктивная схема ВОТК

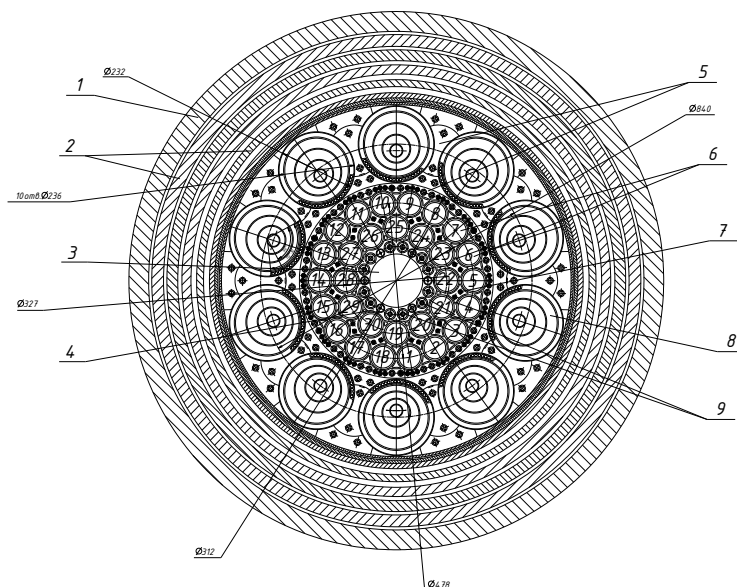


Рисунок 2. Схема поперечного разреза реактора ИВГ.1М

Топливная зона канала набирается из спирально-стержневых двухлопастного профиля твэлов (поперечное сечение 2,8×1,5 мм) с шагом закрутки лопасти 30 мм. Для ВОТК-НОУ первого ряда топливная зона по высоте составляет 800 мм, количество твэлов в пакете составляет 468 шт. Для ВОТК-НОУ третьего ряда топливная зона по высоте составляет 600 мм, количество твэлов в пакете составляет 468 шт. Эквивалентный диаметр активной зоны составляет 548 мм.

Топливо в твэле сделано из урановых нитей в количестве 133 штук с обогащением 19,75 % по  $U^{235}$ , впрессованных в циркониевый сплав Э110. Для дис-

танционирования твэлов используется 24 заполнителя из сплава Э110 диаметром 1,6 и 2,2 мм.

## 2 РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ КРИТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИР ИВГ.1М

С сентября по октябрь 2016 года проводились работы по замене штатных ВОТК ячейки № 14 и 24 активной зоны исследовательского реактора (см. рисунок 2) на экспериментальные ВОТК-НОУ, а также физические исследования по проверке критического состояния исследовательского реактора ИВГ.1М после замены штатных ВОТК-ВОУ.

По результатам проведенных физических исследований определено, что эффект реактивности реак-

тора после замены ВОТК-ВОУ третьего ряда на ВОТК-НОУ составил +0,155  $\beta\text{эф}$  Эффект реактивности после замены ВОТК-ВОУ первого ряда на ВОТК-НОУ составил +0,24  $\beta\text{эф}$  Суммарный эффект реактивности реактора после замены двух ВОТК-ВОУ на ВОТК-НОУ составил +0,395  $\beta\text{эф}$ .

По предварительным расчетам суммарный эффект реактивности реактора после замены двух ВОТК-ВОУ на ВОТК-НОУ должен был составить +0,34  $\beta\text{эф}$ . Из этого следует, что суммарный запас реактивности двух экспериментальных ВОТК-НОУ на +0,055  $\beta\text{эф}$  больше, чем предполагалось ранее.

На данный момент проводятся реакторные испытания на уровне мощности 6 МВт двух экспериментальных ВОТК-НОУ в составе существующей активной зоны для определения соответствия каналов предъявляемым техническим требованиям и получения экспериментальных данных для принятия решения об изготовлении партии штатных каналов и комплектации ими активной зоны реактора ИВГ.1М по результатам испытаний и исследований.

### 3 СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОТК

С 18 октября 2017 года на исследовательском реакторе провели 14 реакторных испытаний двух экспериментальных ВОТК-НОУ. Суммарное энерговыделение по нейтронной мощности реактора составило 278,2 МВт×час.

| №                         | Дата                 | ПУСК    | Длительность, мин | Энерговыделение за пуск, МВт×час |
|---------------------------|----------------------|---------|-------------------|----------------------------------|
| 1                         | 18 октября 2017 года | П-17-05 | 336               | 33,6                             |
| 2                         | 22 ноября 2017 года  | П-17-06 | 266               | 26,6                             |
| 3                         | 29 ноября 2017 года  | П-17-07 | 180               | 18                               |
| 4                         | 12 декабря 2017 года | П-17-08 | 190               | 19                               |
| 5                         | 21 декабря 2017 года | П-17-09 | 170               | 17                               |
| 6                         | 11 января 2018 года  | П-18-01 | 190               | 19                               |
| 7                         | 25 января 2018 года  | П-18-02 | 200               | 20                               |
| 8                         | 08 февраля 2018 года | П-18-03 | 200               | 20                               |
| 9                         | 22 февраля 2018 года | П-18-04 | 180               | 18                               |
| 10                        | 06 марта 2018 года   | П-18-05 | 170               | 17                               |
| 11                        | 28 марта 2018 года   | П-18-06 | 210               | 21                               |
| 12                        | 13 апреля 2018 года  | П-18-07 | 90                | 9                                |
| 13                        | 24 апреля 2018 года  | П-18-08 | 200               | 20                               |
| 14                        | 15 мая 2018 года     | П-18-09 | 200               | 20                               |
| Суммарное энерговыделение |                      |         |                   | 278,2                            |

Во время проведенных реакторных испытаний технологические параметры (расход, давление, температура) ВОТК регистрировались подсистемой контрольно-измерительных приборов и автоматики информационно-измерительной системы с частотой один раз в секунду.

По зарегистрированным данным была проведена сравнительная оценка технологических параметров ВОТК-НОУ с ВОТК-ВОУ.

Давление воды в ВОТК-НОУ ячейки активной зоны реактора № 14 и 24 во время проведения пуска практически единично с остальными ВОТК-ВОУ.

Расход воды через ВОТК-НОУ ячейки № 14 активной зоны реактора лежит в пределах среднего расхода воды через ВОТК третьего ряда и равен 1,82 кг/с, а расход воды через ВОТК-НОУ ячейки № 24 больше среднего расхода воды через ВОТК первого ряда на 0,2 кг/с, и равен 2,25 кг/с.

Средний нагрев воды в ВОТК-НОУ ячейки № 14 активной зоны реактора выше среднего нагрева воды ВОТК третьего ряда на 1,5 °С, а нагрев воды в ВОТК-НОУ ячейки № 24 активной зоны реактора соответствует среднему нагреву воды в ВОТК первого ряда.

### 4 ВЫГОРАНИЕ ТОПЛИВА ПО $U^{235}$

Основной задачей реакторных испытаний является достижение выгорания по  $U^{235}$  – 1,82 грамма для каждого экспериментального канала и флюенса –  $10^{18}$  н/см<sup>2</sup>.

Количество выгоревшего (т.е. разделившегося и претерпевшего радиационный захват  $U^{235}$ ) при работе исследовательского реактора ИВГ.1М на мощности  $N$  (МВт) в течение времени  $t$  (час) при энерговыработке  $Q$  (МВт×час)) урана-235 для каждого канала можно найти по формуле [1]:

$$m_{\text{выг}} = 51 \cdot 10^{-3} N t = 0,051 Q$$

где 0,051 – удельный расход топлива, г/МВт×час;  $Q$  – поканальное энерговыделение, МВт×час.

Поканальное энерговыделение

$$Q = N t$$

где  $N$  – поканальная мощность, МВт;  $t$  – продолжительность пуска, с.

Ввиду отсутствия данных по поканальной нейтронной мощности, целесообразно рассчитать поканальную тепловую мощность:

$$N_{\text{канала}} = 4183 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}^\circ\text{C}} G t (T_2 - T_1)$$

где  $G$  – поканальный расход воды, кг/с;  $t$  – время, с;  $T_2$  – температура воды на выходе из канала; °С;  $T_1$  – температура воды на входе в реактор; °С.

На момент проведенного последнего пуска реактора рассчитано выгорание  $U^{235}$  в ВОТК-НОУ ячеек № 14 и № 24, значение которого:

- по каналу № 14 активной зоны реактора составляет 0,44 грамма;
- по каналу № 24 активной зоны реактора составляет 0,56 грамма.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Запас реактивности экспериментальных ВОТК-НОУ соответствует расчетным значениям.

2. Технические параметры (расход, давление, разница температуры) двух экспериментальных ВОТК-НОУ соответствует предъявляемым требованиям.

3. На данный момент было достигнуто выгорание по урану-235 для канала № 14 активной зоны реактора 24 % и для канала № 24 активной зоны реактора 31 % от требуемых выгорания топлива по  $U^{235}$  1,82 грамма и флюенса  $10^{18}$  н/см<sup>2</sup>.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Нигматулин И.Н., Нигматулин Б.И. Ядерные энергетические установки: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.: ил.
2. Протокол входного контроля твэлов ВОТК-НОУ реактора ИВГ.1М № 01-600-18/957вн от 16.06.2016 года.
3. Протокол определения содержания  $U^{235}$  в твэлах ВОТК-НОУ реактора ИВГ.1М № 13-240-02/1091вн от 04.07.2016 года.
4. Акт готовности ВОТК-НОУ к загрузке в реактор ИВГ.1М № 37-370-01/1174вн от 21.07.2016 года.
5. Акт загрузки активной зоны реактора ИВГ.1М № 37-370-01/121а от 30.01.2017 года.
6. Отчет. Загрузка ВОТК-НОУ в реактор № 37-370-01/1758вн от 08.11.2016 года.

#### «ИВГ.1М ЗЕРТТЕУ РЕАКТОРЫНЫҢ КОНВЕРСИЯСЫ АЯСЫНДА ТӨМЕН БАЙЫТЫЛҒАН ОТЫНЫ БАР СУМЕН САЛҚЫНДАТЫЛАТЫН ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ КАНАЛДАРДЫҢ РЕАКТОРЛЫҚ СЫНАҚТАРЫ» МАҚАЛАСЫНА

М.К. Скаков, А.Д. Вурим, В.С. Гныря, А.С. Азимханов, А.Н. Колбаенков, И.К. Дербышев, Е.Б. Нуржанов

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

Каналдарға қойылған техникалық талаптарға сәйкестігін анықтау және штаттық каналдардың партиясын жасау туралы және сынақтар мен зерттеулердің нәтижелері бойынша реактордың активтік аумағын жинақтау туралы шешім қабылдау үшін қажетті эксперименттік мәліметтерді алу мақсатында ИВГ.1М зерттеу реакторында төмен байытылған уран отыны бар эксперименттік сумен салқындатылатын технологиялық каналдарды реакторлық сынау жүргізілуде.

Осы мақалада төмен байытылған уран отыны бар эксперименттік сумен салқындатылатын технологиялық каналдарды реакторлық сынауды жүргізген уақытындағы технологиялық параметрлердің (шығыны, қысымы, температурасы) салыстырмалы бағасының нәтижелері және ИВГ.1М зерттеу реакторының жүзеге асырылған іске қосулары бойынша төмен байытылған уран отыны бар эксперименттік сумен салқындатылатын технологиялық каналдарда  $U^{235}$  жанып біту есебінің нәтижелері келтірілген.

#### IN-PILE TESTS OF WATER-COOLED TECHNOLOGICAL CHANNELS WITH LOW-ENRICHED URANIUM FUEL WITHIN CONVERSION OF IVG.1M RESEARCH REACTOR

M.K. Skakov, A.D. Vurim, V.S. Gnyrya, A.S. Azimkhanov, A.N. Kolbayenkov, I.K. Derbyshev, Ye.B. Nurzhanov

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

IVG.1M research reactor performs tests of WCTCs-LEU in order to determine whether channels correspond to technical requirements or not and to obtain experimental data necessary to take a decision concerning manufacture of a batch of standard channels and their insertion into reactor core based on results of tests and researches.

The paper presents results of comparative assessment of technological parameters (flow rate, pressure, temperature) during in-pile testing of WCTCs-LEU and results of  $U^{235}$  burn-out calculation in WCTCs-LEU according to implemented start-ups of IVG.1M research reactor.

УДК 621.039.586

## РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Жагипарова Л.К., Котов В.М.

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

В статье представлено расчетное исследование нейтронно-физических характеристик экспериментального устройства (ЭУ), предназначенного для имитации остаточного энерговыделения в расплаве ловушки за счет нейтронного облучения [1]. Проведены расчетные определения отношения энерговыделения в расплаве в различных вариантах наполнения ловушки к энерговыделению в реакторе. Выработаны предложения по оптимальному проведению физического пуска.

### ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безопасности эксплуатации ядерных реакторов является одной из важнейших задач атомной энергетики. Для решения вопросов, связанных с безопасностью энергетических реакторов, проводится большой объем работ, включающих в себя как теоретические, так и экспериментальные исследования.

На протяжении нескольких лет в Институте атомной энергии проводится анализ безопасности реакторных установок. Одной из основных целей таких работ на реакторе ИГР является изучение процессов, связанных с плавлением элементов тепловыделяющих сборок (ТВС) в результате тяжелой аварии реакторов на быстрых нейтронах.

Одним из важных факторов при этом является влияние остаточного энерговыделения в расплавленном топливе, вышедшем из активной зоны реактора. Ограничение интеграла энерговыделения в ИГР формирует особенности таких экспериментов. Так, остаточное энерговыделение моделируется облучением расплава топлива нейтронами реактора. В начальной стадии эксперимента расплав образуется из ТВС реактора и перемещается в графитовую ловушку, расположенную ниже пространства ТВС.

Создание требуемого энерговыделения в расплаве ловушки требует проведения комплекса расчетных и экспериментальных работ. Сложности этой задачи связаны с тем, что при традиционном размещении ТВС с совмещением ее центра с центром активной зоны, ловушка попадает в зону с малым потоком нейтронов. Для решения этой проблемы принято поднять ТВС над центром активной зоны ИГР. Это, в свою очередь, создает новые проблемы: усиливается влияние положения стержней регулирования ИГР на поток в месте размещения ловушки, создается существенное различие в потоках нейтронов горячего реактора (в ходе эксперимента) и холодного (в ходе контрольного физического пуска).

В данной статье представлены расчетные и экспериментальные работы, позволившие определить условия проведения эксперимента с моделированием остаточного энерговыделения в расплаве топлива, попавшем в ловушку.

### 1. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основные элементы конструкции экспериментального устройства представлены на рисунке 1 [2]. В его состав входят неподвижная ампула НА-290, ТВС в несущем чехле, графитовая ловушка расплава, вторая ловушка, обеспечивающая требуемую безопасность проведения работ, надежность экспериментального устройства и реактора в ходе проведения эксперимента.

Ловушка расплава, предназначенная для приема расплава топлива, размещена под активной зоной реактора ИГР, отметка «–849 мм» соответствует днищу ловушки (рисунок 1).

В чехле размещена ТВС, представляющая собой двухрядную сборку из 54 твэлов (рисунок 2). В твэлах установлены топливные таблетки реактора БН-350 из диоксида урана с обогащением 17 % в активной части и с содержанием  $^{235}\text{U}$  – 0,27 % в бланкетной части топливного столба (таблица 1). Центр топливного столба ТВС смещен на 500 мм выше центра активной зоны реактора. Сам чехол является барьером, снижающим тепловое воздействие на неподвижную ампулу и предотвращающим контактное взаимодействие топлива с ней.

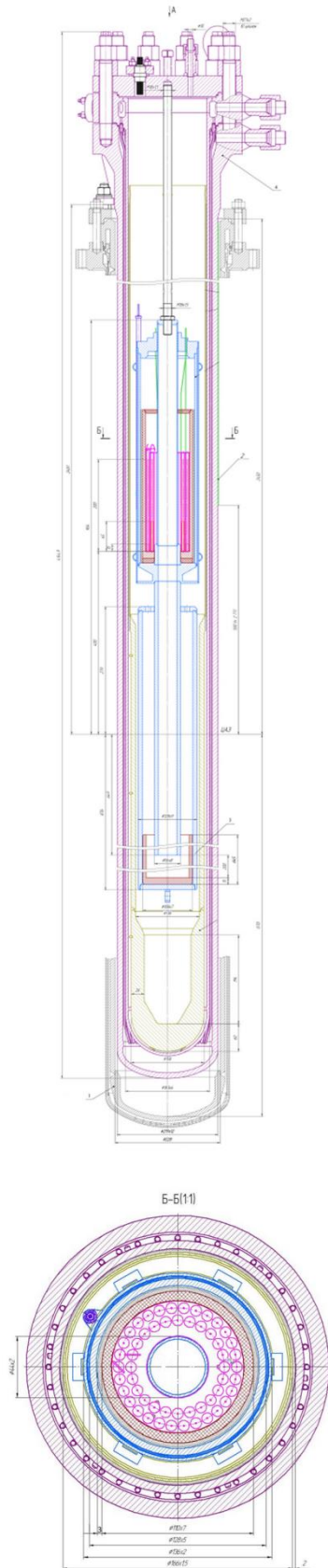
### 2. ЗАДАЧИ РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как указано во введении, эксперимент с имитацией энерговыделения в ловушке расплава осложнен рядом факторов:

- ловушка расплава находится ниже активной зоны реактора ИГР;
- расплав топлива попадает в ловушку после прохождения значительной части эксперимента, когда кладка реактора существенно разогревается;
- в момент падения расплава, управляющие стержни реактора подняты из нижнего положения, искажая высотное распределение поле нейтронов в реакторе против начального.

Таким образом, для корректного определения энерговыделения в расплаве необходимо проведение ряда нейтронно-физических расчетов и сравнительного эксперимента – аналога одного из расчетов.

**РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА**

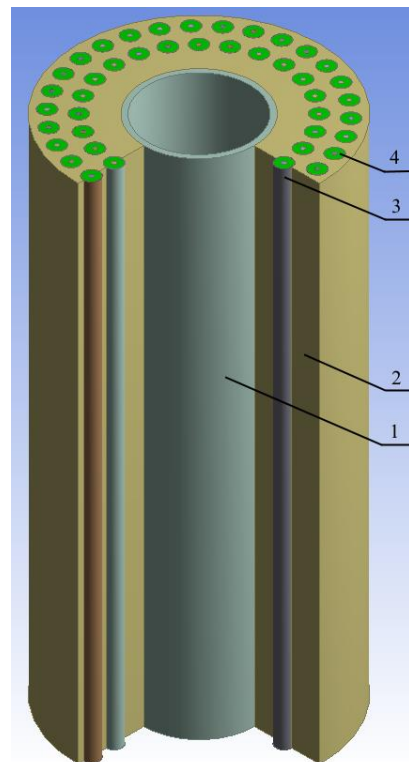


1 – неподвижная ампула; 2 – чехол ТВС; 3 – ловушка расплава

*Рисунок 1. Экспериментальное устройство*

*Таблица 1. Технические характеристики ТВС*

| Наименование параметра                                                     | Значение         |
|----------------------------------------------------------------------------|------------------|
| Топливо                                                                    | диоксид урана    |
| Содержание $^{235}\text{U}$ в топливе, %                                   |                  |
| – в активной части                                                         | 17               |
| – в бланкетной части                                                       | 0,27             |
| Плотность, $\text{кг/м}^3$                                                 | $9700 \pm 10300$ |
| Наружный диаметр топливной таблетки, мм                                    | $5,9 \pm 0,02$   |
| Внутренний диаметр топливной таблетки, мм                                  | $1,5 \pm 0,1$    |
| Длина топливного столба, мм                                                | 200              |
| Длина активной части топливного столба<br>наружного ряда, не менее, мм     | 185              |
| Длина активной части топливного столба<br>внутреннего ряда, не менее, мм   | 135              |
| Длина бланкетной части топливного столба<br>наружного ряда, не более, мм   | 15               |
| Длина бланкетной части топливного столба<br>внутреннего ряда, не более, мм | 65               |
| Материал оболочки                                                          | 12X18H10T        |
| Наружный диаметр оболочки, мм                                              | 8                |
| Внутренний диаметр оболочки, мм                                            | 6                |
| Масса топливных таблеток в ТВС, кг                                         | 2,734            |



1 – направляющая стальная труба; 2 – газовая среда чехла ТВС;  
3 – внутренний ряд твзлов; 4 – наружный ряд твзлов

*Рисунок 2. Разрез модельной ТВС*

Был выбран следующий ряд расчетных ситуаций:

- физический пуск с полным набором топлива в виде стержневых ТВЭлов;
- физический пуск с полным набором топлива в виде стержневых ТВЭлов, высота стержневых ТВЭлов равна высоте однородного расплава;
- физический пуск с полным набором топлива при имитации расплава горячими стержневыми ТВЭлами;
- горячий пуск с полным набором топлива при имитации расплава горячими стержневыми ТВЭлами;
- горячий пуск с полным переливом топлива (однородный расплав);
- горячий пуск с переливом половины топлива (однородный расплав);
- физический пуск с шестью таблетками.

В эксперименте проверялась ситуация физического пуска с шестью таблетками.

### 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ

Нейтронно-физические расчеты выполнены при помощи программы MCNP5 [3], с использованием модели реактора ИГР [4].

Расчетная модель реактора ИГР максимально приближена к реальной конструкции реактора: заданы зазоры между колоннами кладки в активной зоне и в отражателе, задана переменная концентрация урана по топливным блокам. Разработанная модель учитывает:

- перемещение стержней регулирования в ходе пуска;
- динамику работы реактора с учетом неравномерности нагрева отдельных частей кладки.

Активная зона, боковой, нижний, верхний и подвесной отражатели реактора ИГР в расчетной модели представлены блочной структурой. В расчетной модели реактора ИГР в ЦЭКе смоделирован макет устройства. Модель устройства максимально приближена к реальной конструкции ЭУ.

В результате проведенных расчетов вычислено отношение энерговыделения в топливе к энерговыделению в реакторе по формуле (1):

$$k = \frac{q}{Q} \cdot \frac{1}{m} \quad (1)$$

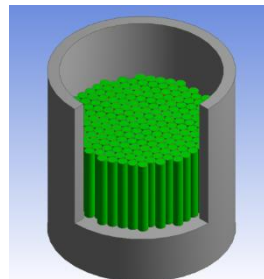
где:  $q$  – энерговыделение в топливе, о.е.;  
 $Q$  – энерговыделение в реакторе ИГР, о.е.;  
 $m$  – масса топлива, г.

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

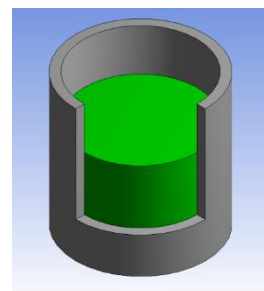
Состояние реактора близкое к критическому, достигается соответствием температуры кладки и положением управляющих стержней.

Расплав в ловушке ЭУ рассмотрен в виде стержневых ТВЭлов (расчеты номер 1–4 и рисунок 3, а), однородного расплава (расчеты номер 5 и 6, рисунок 3, б) и в виде таблеток (расчет номер 7 и рисунок 3, в).

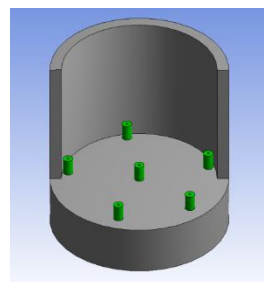
В расчетах в № 1, 3, 4, 5 масса топлива в ловушке соответствует массе топлива с обогащением 17 % в чехле ТВС (таблица 2, рисунок 3). В расчете № 2 высота стержневых ТВЭлов соответствует высоте однородного расплава в ловушке расплава (таблица 2, рисунок 3). В расчете № 6 масса топлива в ловушке соответствует половине массы топлива с обогащением 17 % в чехле ТВС (таблица 2, рисунок 3). В расчете № 7 смоделированы таблетки типа БН-350 из диоксида урана с обогащением 17 % по  $^{235}\text{U}$  высотой 10 мм в ловушке расплава (таблица 2, рисунок 3).



а) расчеты № 1, 2, 3, 4



б) расчеты № 5, 6



в) расчет № 7

Рисунок 3. Ловушка с различными видами расплава

Проведены расчеты нейтронно-физических характеристик устройства с различными вариантами размещения расплава топлива в ловушке для горячей и холодной кладки реактора ИГР при соответствующих положениях органов регулирования. Получено отношение энерговыделения в топливе к энерговыделению в реакторе для расчетных вариантов, позволяющее определить соответствие характеристик энерговыделения на физическом и горячем пусках реактора. Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры и результаты расчетов

|                                                                                 | 1 расчет  | 2 расчет  | 3 расчет  | 4 расчет  | 5 расчет   | 6 расчет   | 7 расчет  |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|
| Реактивность, $\beta$                                                           | 0,43±0,01 | 0,42±0,01 | 0,54±0,01 | 1,38±0,01 | 0,20±0,01  | 0,19±0,01  | 0,44±0,01 |
| Температура кладки, К                                                           | 294       | 294       | 294       | 1200      | 1200       | 1200       | 294       |
| Масса топлива с обогащением 17 % в чехле ТВС, г                                 | 2316      | 2316      | 2316      | 2316      | 0          | 0          | 2181      |
| Энерговыведение в реакторе ИГР, о.е.                                            | 77,29     | 77,29     | 77,35     | 77,53     | 76,93      | 76,92      | 77,27     |
| Топливо в графитовом стакане                                                    | твэлы     | твэлы     | твэлы     | твэлы     | гомогенное | гомогенное | таблетки  |
| Температура, К                                                                  | 294       | 294       | 3100      | 3100      | 3100       | 3100       | 294       |
| Высота, мм                                                                      | 44,2      | 34,6      | 44,2      | 44,2      | 34,6       | 17,3       | 10        |
| Масса, г                                                                        | 2316      | 1698      | 2316      | 2316      | 2316       | 1158       | 14,75     |
| Масса $^{235}\text{U}$ , г                                                      | 343,51    | 251,97    | 343,51    | 343,51    | 343,51     | 171,81     | 2,52      |
| Отношение энерговыведения в топливе к энерговыведению в реакторе, $10^{-7}$ 1/г | 3,37±0,01 | 4,01±0,01 | 3,43±0,01 | 3,87±0,01 | 2,87±0,01  | 3,81±0,01  | 8,18±0,01 |

При увеличении температуры топлива в ловушке отношение энерговыведения в топливе к энерговыведению в реакторе увеличивается на ~1,7 % (расчеты №№ 1 и 3). При увеличении температуры кладки реактора и топлива в ловушке энерговыведение увеличивается на ~12,9% (расчеты №№ 1 и 4). При изменении вариантов размещения топлива в ловушке и при увеличении температуры топлива в ловушке и кладки реактора энерговыведение увеличивается на ~14,8% (расчеты №№ 1 и 5). При изменении вариантов размещения топлива в ловушке и при одинаковых условиях физического пуска энерговыведение в таблетках увеличивается более чем в 2 раза (расчеты №№ 1 и 7). При одинаковых условиях горячего пуска с гомогенным распределением топлива в ловушке (масса и высота топлива разные) энерговыведение меньше при большей массе топлива в ловушке.

На рисунке 4 показано распределение энерговыведения по высоте топлива в различных вариантах заполнения ловушки. Отметка «-849 мм» соответствует днущу графитового стакана ловушки расплава.

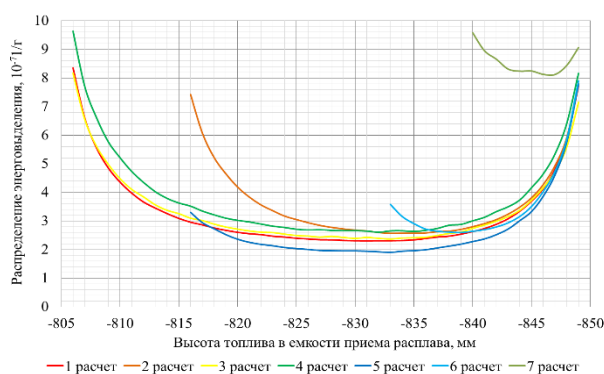


Рисунок 4. Распределение энерговыведения по высоте топлива в различных вариантах заполнения ловушки

Получено соотношение энерговыведения в расплаве и активной зоне реактора для расчетных вариантов, позволяющее определить соответствие характеристик энерговыведения в различных вариантах физического и горячих пусков реактора.

Проведение физического пуска с получением представительной информации возможно при использовании вариантов стержневого наполнения ловушки расплава с полным набором топливных стержней и набором из шести топливных таблеток. Учитывая трудоемкость работ предпочтителен второй вариант.

### 5. ФИЗИЧЕСКИЙ ПУСК

Изготовлены детали и выполнена сборка физического макета экспериментального устройства для исследования параметров течения расплавленных материалов активной зоны по направляющей трубе стержня регулирования. Проведено реакторное облучение физического макета экспериментального устройства. После разборки физического макета шесть топливных таблеток из ловушки и твэлы из ТВС направлены на спектрометрические измерения активности продуктов деления.

Результаты спектрометрических измерений [4] сравнены с результатами расчетов [5]. На рисунке 5 показаны распределения энерговыведения в топливе по высоте наружного и внутреннего ряда твэлов, полученные в расчетах и в эксперименте.

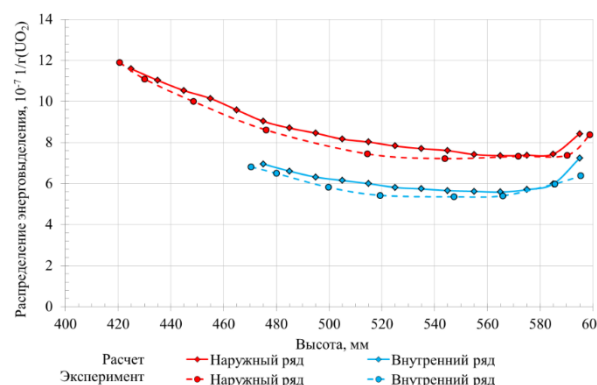


Рисунок 5. Распределение энерговыведения по высоте топлива чехла ТВС

Рост энерговыделения в районе торцов твэлов объясняется повышенным, по сравнению с соседними областями, потоком нейтронов, обусловленным меньшим объемом топлива. Различия в уровнях энерговыделения по рядам обусловлены наличием блок-эффекта внутренних рядов твэлов наружными.

Спектрометрические [4] и расчетные [5] отношения энерговыделения в активной части топлива чехла ТВС к энерговыделению в реакторе ИГР приведены в таблице 3.

Таблица 3. Отношение энерговыделения в активной части топлива чехла ТВС к энерговыделению в реакторе ИГР

| Наименование     | Отношение энерговыделения активной части топлива к энерговыделению в реакторе, $1/\text{г}(\text{UO}_2) \times 10^{-7} \pm 0,001$ |             |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
|                  | расчет                                                                                                                            | эксперимент |
| Наружный ряд     | 8,45                                                                                                                              | 8,43        |
| Внутренний ряд   | 5,86                                                                                                                              | 5,82        |
| Среднее значение | 7,49                                                                                                                              | 7,27        |

Схема расположения топливных таблеток в ловушке расплава показана на рисунке 6. По результатам спектрометрических измерений [4] и по результатам расчетов [5] определили отношение энерговыделения топливных таблеток в ловушке к энерговыделению реактора. Результаты спектрометрических [4] и расчетных [5] измерений показаны на рисунке 7 и в таблице 4.

Таблица 4. Отношение энерговыделения в топливных таблетках ловушки к энерговыделению в реакторе ИГР

| № табл. п/п      | Положение таблетки в графитовом стакане | Отношение энерговыделения в топливных таблетках к энерговыделению в реакторе, $10^{-7} 1/\text{г}(\text{UO}_2) \pm 0,001$ |             | Масса $\text{UO}_2$ , г $\pm 0,02$ |
|------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------------------------------|
|                  |                                         | расчет                                                                                                                    | эксперимент |                                    |
| 1                | центр                                   | 8,33                                                                                                                      | 8,05        | 2,47                               |
| 2                | периметр                                | 7,94                                                                                                                      | 7,87        | 2,43                               |
| 3                | периметр                                | 8,19                                                                                                                      | 7,87        | 2,46                               |
| 4                | периметр                                | 8,29                                                                                                                      | 7,77        | 2,46                               |
| 5                | периметр                                | 8,13                                                                                                                      | 7,66        | 2,47                               |
| 6                | периметр                                | 8,21                                                                                                                      | 7,77        | 2,46                               |
| Среднее значение |                                         | 8,18                                                                                                                      | 7,83        | –                                  |

## ВЫВОДЫ

Проведено расчетное исследование нейтронно-физических характеристик экспериментального устройства с различными вариантами размещения расплава топлива в ловушке расплава для горячей и холодной кладки реактора ИГР при соответствующих положениях органов регулирования. В расчетах использовались варианты с гомогенным распределением расплава, модель расплава в виде набора стержневых твэлов требуемой массы и в виде таблеток. По результатам расчетов выбран вариант проведения физического пуска с шестью топливными таблетками в графитовом стакане.

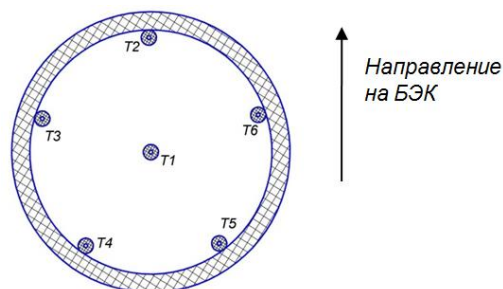


Рисунок 6. Схема установки топливных таблеток в ловушке

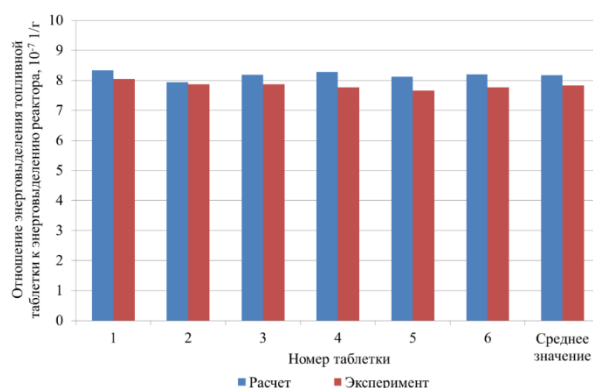


Рисунок 7. Отношение энерговыделения в топливных таблетках ловушки к энерговыделению в реакторе ИГР

Проведен физический пуск ИГР с макетом, содержащем шесть таблеток в ловушке. Проведены спектрометрические измерения активности продуктов деления в таблетках ловушки и твэлах ТВС. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показали их хорошее соответствие.

Полученные данные позволяют определить характеристики режима работы ИГР при проведении испытаний вариантов экспериментального устройства, обеспечивающих имитацию остаточного энерговыделения в расплаве ловушки за счет нейтронного облучения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Программа физических исследований «Эксперимент ID-6» / №11-220-02/656вн от 26.04.2017 г.
2. Эскизный проект экспериментального устройства ID-6: АК.21264.00.000ЭП / Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК. – Курчатов, инв. № К-52184 от 12.02.2015 г.
3. MCNP-5.1.40 Monte-Carlo N-Particle Transport Code; Los Alamos National Laboratory; Los Alamos, New Mexico. – April 24, 2003.
4. Компьютерная модель реактора ИГР для стационарных нейтронно-физических расчетов: а. с. № 2738 от 27.12.16 г. Республика Казахстан / А.Д. Вурим, В.М. Котов, Р.А. Иркимбеков, Л.К. Жагипарова, А.А. Байгожина.
5. Протокол определения соотношения энерговыделения в ТВС, мониторе физического макета экспериментального устройства ID-6 и активной зоне реактора ИГР / 13-240-02 621вн от 30.03.2018 г / Гановичев Д.А.
6. Техническая справка «Энерговыделение в топливе ФМ ЭУ ID-6» / №11-220-01/701вн от 12.04.2018 г / Пахниц А.В.

#### ЭКСПЕРИМЕНТТІК ҚҰРЫЛҒЫНЫҢ НЕЙТРОНДЫҚ-ФИЗИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН ЕСЕПТІК ЗЕРТТЕУ

Л.К. Жагипарова, В.М. Котов

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

Мақалада нейтрондық сәулелену есебінен тұзақтың балқытпасында қалдық энергия шығарылуын еліктеуге арналған эксперименттік құрылғының (ЭҚ) нейтрондық-физикалық сипаттамаларының есептік зерттеулері ұсынылды [1]. Реакторда энергия шығарылуына тұзақтарды толтырудың түрлі нұсқаларында, қорытпада энергия шығарылуына қатысты есептік анықталар жүргізілді. Физикалық іске косуды тиімді жүргізу бойынша ұсыныстар өңделді.

#### CALCULATED STUDY OF NEUTRONIC CHARACTERISTICS OF EXPERIMENTAL DEVICES

L.K. Zhagiparova, V.M. Kotov

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

The article presents calculated study of the neutronic characteristics of the experimental device (ED) designed to simulate the residual energy release in the melt trap due to neutron irradiation [1]. The relations of energy release in the melt in different variants of traps filling to the energy release in the reactor are estimated. Proposals for optimal physical start-up have been developed.

УДК 621.039.5

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ НА САМОПОГЛОЩЕНИЕ ГАММА-КВАНТОВ ПРИ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ «ТОЛСТЫХ» ОБРАЗЦОВ ИЗ ДИОКСИДА УРАНА

Жмук Д.В., Медетбеков Б.С., Попов Ю.А.

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

Настоящая работа посвящена экспериментальной проверке методики расчета поправочных коэффициентов на самопоглощение гамма-квантов при постреакторном определении энерговыделения в топливных детекторах, облученных при испытаниях на реакторах ИГР и ИВГ.1М.

В статье представлены результаты исследований по определению числа делений в «толстых» образцах и «тонких» порошкообразных препаратах гамма-спектрометрическим методом. Приведен сравнительный анализ результатов определения числа делений в топливных таблетках и порошкообразных препаратах, на основании которого была подтверждена правильность выбора инженерной методики расчета поправочных коэффициентов на самопоглощение гамма-квантов в «толстых» образцах.

## ВВЕДЕНИЕ

На реакторах НЯЦ РК, в частности на реакторе ИГР, в рамках проекта EAGLE продолжают исследования прототипов ТВС активных зон реакторов на быстрых нейтронах, начатые 20 лет назад. Традиционно этап проведения исследовательского пуска предваряется проведением физических исследований с физическим макетом экспериментального устройства, повторяющим экспериментальное устройство в части геометрии и используемых материалов, в том числе тепловыделяющей сборки (ТВС). Важным этапом проведения физических исследований с физическими макетами экспериментальных устройств является определение энерговыделения (тепловыделения) в топливе ТВС. Это неотъемлемая часть физических исследований, в ходе проведения которой решается задача получения экспериментальных данных для расчета и выбора диаграммы изменения мощности реактора ИГР при проведении исследовательского пуска.

В ближайшие годы планируется перевод реактора ИВГ.1М с высокообогащенного (ВОУ) на низкообогащенный уран (НОУ) и проведение физического пуска реактора с активной зоной, загруженной технологическими каналами с НОУ (ВОТК-НОУ). Одним из этапов физического пуска является так же определение числа делений и энерговыделения (тепловыделения) в ТВС физических макетов ВОТК-НОУ ядерно-физическими методами.

Определение числа делений в топливных образцах гамма-спектрометрическим методом проводят, рассчитывая абсолютную активность продуктов деления  $^{235}\text{U}$  (ПД) в образцах. При определении абсолютной активности ПД в образцах зарегистрированную интенсивность гамма-излучения умножают на ряд поправочных коэффициентов, один из которых учитывает эффект ослабления регистрируемого гамма-излучения материалами топливной композиции и носит название коэффициента самопоглощения ( $K_{cp}$ ). Для определения коэффициента самопоглощения

предлагается использовать инженерную методику расчета  $K_{cp}$  в образцах [1]. Авторы рекомендуют использовать методику для расчета  $K_{cp}$  в образцах с долей поглощенных гамма-квантов до 10 % («тонкие образцы») [1].

Настоящая работа направлена на проверку инженерной методики расчета поправочного коэффициента самопоглощения гамма-квантов с энергиями 756 и 1596 кэВ в «толстых» образцах из диоксида урана с долей поглощенных гамма-квантов до 40 %.

## УСЛОВИЯ И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектом исследований являлись топливные таблетки из диоксида урана типа ВВЭР-1000 с обогащением 4,4 % по изотопу уран-235 (2 шт.) и порошкообразные препараты, полученные из таблеток ВВЭР-1000 путем измельчения. Таблетки были облучены на пуске 185Ф4 реактора ИГР в облучательном устройстве (ОУ).

ОУ для размещения образцов представляло собой цилиндрический контейнер, изготовленный из алюминиевого сплава. ОУ размещалось в полости корпуса физического макета экспериментального устройства ПК таким образом, чтобы топливные таблетки с обогащением 4,4 % находились на уровне центра активной зоны реактора ИГР. Конструктивная схема ОУ приведена на рисунке 1.

Перед оснащением ОУ были определены физические характеристики топливных таблеток (геометрические параметры и масса) (таблица 1).

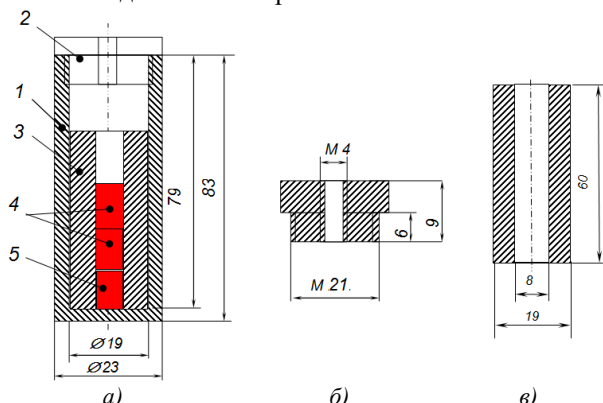
Таблица 1. Физические характеристики топливных таблеток

| Образец        | Масса, г | Диаметр, мм | Высота, мм | Обогащение по $^{235}\text{U}$ , % |
|----------------|----------|-------------|------------|------------------------------------|
| T1 (ВВЭР-1000) | 4,54     | 7,55        | 10,7       | 4,4                                |
| T2 (ВВЭР-1000) | 4,57     | 7,55        | 10,7       | 4,4                                |

Физические исследования проводились с помощью гамма-спектрометра *Canberra Inspector-2000* с

полупроводниковым детектором GL0515 из особо чистого германия.

После проведения облучения в центральном экспериментальном канале реактора ИГР топливные таблетки были извлечены из ОУ для проведения гамма-спектрометрического анализа. Спектрометрические исследования гамма-излучения облученных топливных таблеток проводились с помощью гамма-спектрометра *Canberra Inspector-2000* с полупроводниковым детектором GL0515 из особо чистого германия. Расстояние от образцов до крышки детектора составило для всех измерений 92 мм.



1 - корпус ОУ, 2 - крышка ОУ (материал - алюминиевый сплав АМг6),  
3 - дистанцирующая втулка, 4 - таблетки с обогащением 4,4 %, 5 - таблетка с обогащением 0,27 %

Рисунок 1. Конструктивная схема контейнера для облучения образцов: а) корпус ОУ; б) крышка; в) дистанцирующая втулка

После измерений двух таблеток из диоксида урана с обогащением 4,4 % было проведено измельчение этих таблеток и приготовление «тонких» порошкообразных препаратов из диоксида урана. Измерительные препараты представляли собой измельченный материал топливной композиции, нанесенный равномерным слоем на цилиндрическую подложку – контейнер диаметром 18,7 мм.

Таблица 2. Физические характеристики порошкообразных препаратов из  $UO_2$

| Образец | Масса, г | Диаметр, мм | Высота, мм | Массовая толщина, г/см <sup>2</sup> |
|---------|----------|-------------|------------|-------------------------------------|
| П11     | 1,961    | 18,7        | 0,86       | 0,714                               |
| П12     | 4,491    | 18,7        | 2          | 1,64                                |
| П21     | 2,240    | 18,7        | 0,99       | 0,816                               |
| П22     | 4,511    | 18,7        | 2          | 1,64                                |

Дальнейшие исследования заключались в определении физических характеристик порошка, измерении гамма-спектров «тонких» порошкообразных препаратов, расчете поправочных коэффициентов и удельного числа делений в таблетках и порошкообразных препаратах, сравнительном анализе удельного числа делений в таблетках и порошкообразных препаратах

Основные физические характеристики образцов в виде таблеток и порошка представлены в таблицах 1 и 2.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ДЕЛЕНИЙ $^{235}U$ В ТОПЛИВНЫХ ОБРАЗЦАХ

Удельное число делений в детекторах при определении по активности  $^{140}La$  вычисляется по формуле [2-4]:

$$N_{y0} = \frac{S_{nnn} \cdot K_g \cdot K_{sp}}{t_{жс} \cdot \eta \cdot m_U \cdot \varepsilon \cdot F}, \quad (1)$$

где  $K_{sp}$  – коэффициент самопоглощения гамма-излучения с  $E_\gamma=1596$  кэВ в детекторе;  $K_g$  – коэффициент, учитывающий отличие размеров детектора от размеров калибровочных источников;  $\eta$  – выход гамма-квантов с энергией  $E_\gamma=1596$  кэВ ( $\eta=0,954$ ) на один распад  $^{140}La$  [3, 4, 5];  $F$  – временной коэффициент, связывающий активность  $^{140}La$  в момент времени  $T$  после облучения с числом делений  $^{235}U$  в детекторе на конец облучения, 1/с [3, 4, 6]:

$$F = \lambda_1 \cdot \exp(-\lambda_1 \cdot t_e) \cdot \left[ W_2 \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot [\exp((\lambda_1 - \lambda_2) \cdot t_e) - 1] + W_1 \right], \quad (2)$$

где  $\lambda_1 = 4,781 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$  – постоянная распада  $^{140}La$ ;  $\lambda_2 = 6,291 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$  – постоянная распада  $^{140}Ba$ ;  $t_e$  – время выдержки после облучения в реакторе, с;  $W_2 = 6,29 \cdot 10^{-2}$  – кумулятивный выход  $^{140}Ba$ ;  $W_1 = 4,5 \cdot 10^{-5}$  – независимый выход  $^{140}La$  [3, 4, 7].

Удельное число делений в детекторах при определении по активности  $^{95}Zr$  вычисляется по формуле:

$$N_{y0} = \frac{S_{nnn} \cdot K_g \cdot K_{sp}}{t_{жс} \cdot \eta \cdot w \cdot m_U \cdot \varepsilon \cdot e^{-\lambda \cdot t_e}}, \quad (3)$$

где  $S_{nnn}$  – площадь ППП, соответствующая гамма-квантам с энергией  $E_\gamma=756$  кэВ;  $t_{жс}$  – «живое» время регистрации активности  $^{95}Zr$ , с;  $\eta$  – выход гамма-квантов с энергией  $E_\gamma=756$  кэВ ( $\eta=0,55$ ) на один распад  $^{95}Zr$  [5];  $w$  – независимый выход изотопа  $^{95}Zr$  на одно деление  $^{235}U$  ( $w = 6,50 \cdot 10^{-2}$ ) [3, 4, 7];  $m_U$  – масса  $^{235}U$  в детекторе, г;  $\varepsilon$  – эффективность регистрации гамма-квантов с  $E_\gamma = 756$  кэВ спектрометром;  $K_{sp}$  – коэффициент самопоглощения гамма-излучения с  $E_\gamma = 756$  кэВ в детекторе;  $K_g$  – коэффициент, учитывающий отличие размеров детектора от размеров калибровочных источников;  $\lambda$  – постоянная распада  $^{95}Zr$  ( $\lambda=1,25 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ ) [5];  $t_e$  – время от момента окончания облучения до момента начала измерений, с.

Коэффициент  $K_{sp}$  определяется для гамма-квантов с энергией 724 кэВ или 1596 кэВ в зависимости от того, по измерению интенсивности излучения ка-

кого продукта деления производится определение удельного энерговыделения (тепловыделения).

$K_{sp}$  для топливных таблеток вычисляется по формуле:

$$K_{sp} = \frac{\bar{\mu} \times H}{1 - \exp(-\bar{\mu} \times H)}, \quad (4)$$

где  $H$  – высота таблетки, см;

$$\bar{\mu} = \mu \times \frac{\ln(\cos \alpha)}{1 - \cos \alpha}; \quad (5)$$

$\mu$  – линейный коэффициент ослабления гамма-излучения в материале детектора, см<sup>-1</sup>;

$$\cos \alpha = \left( H_{эф} + \frac{H}{2} \right) / \sqrt{\frac{D^2}{4} + \left( H_{эф} + \frac{H}{2} \right)^2}; \quad (6)$$

$D$  – диаметр кристалла датчика спектрометра, регистрирующего гамма-излучение, см (для датчика спектрометра *CANBERRA InSpector GL0515* величина  $D = 2,5$  см);  $H_{эф}$  – расстояние от эффективного центра регистрации датчика до детектора, см.

Результаты расчетов  $K_{sp}$  для топливных таблеток с использованием формулы (4) для <sup>140</sup>La и <sup>95</sup>Zr представлены в таблицах 5 и 7 соответственно.

Для детекторов в виде порошкообразных препаратов  $K_{sp}$  вычисляется по формуле:

$$K_{sp} = \frac{\bar{\mu}_m \times H_m}{1 - \exp(-\bar{\mu}_m \times H_m)}, \quad (7)$$

где  $H_m$  – массовая толщина детектора, г/см<sup>2</sup>;

$$\bar{\mu}_m = \bar{\mu}_m \times \frac{\ln(\cos \alpha)}{\cos \alpha - 1}; \quad (8)$$

$\mu_m$  – массовый коэффициент ослабления гамма-излучения в материале детектора, см<sup>2</sup>/г,  $\mu_m(756 \text{ кэВ}) = 0,1$ ,  $\mu_m(1596 \text{ кэВ}) = 0,0525$ ;

$$\cos \alpha = \left( H_{эф} + \frac{H_m}{2} \right) / \sqrt{\frac{D^2}{4} + \left( H_{эф} + \frac{H_m}{2} \right)^2}; \quad (9)$$

$D$  – диаметр кристалла, регистрирующего гамма-излучение, см;  $H_{эф}$  – расстояние от эффективного центра регистрации датчика до детектора, см.

Геометрический коэффициент учитывает отличие размеров топливных детекторов от размеров калибровочных источников. При измерении интенсивности излучения в ППП продуктов деления в топливных таблетках или топливных порошкообразных препаратах высотой  $H$  коэффициент  $K_g$  определяется по формуле (10) или рассчитывается по формуле (11):

$$K_g = \frac{\varepsilon(H_{эф})_0}{\varepsilon(H_{эф})_H}, \quad (10)$$

$$K_g = 1 + \frac{H}{H_{эф}} + \left( \frac{H}{2 \times H_{эф}} \right)^2, \quad (11)$$

где  $\varepsilon(H_{эф})_0$  – эффективность регистрации гамма-квантов с энергией  $E_\gamma$  от калибровочного источника при размещении его на расстоянии  $H_{эф}$  от эффективного центра регистрации датчика спектрометра;  $\varepsilon(H_{эф})_H$  – эффективность регистрации гамма-квантов с энергией  $E_\gamma$  от таблетки или топливного порошкообразного препарата высотой  $H$  при размещении его на расстоянии  $H_{эф}$  от эффективного центра регистрации датчика спектрометра.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Облучение топливных таблеток было проведено на пуске 185Ф-4 13.09.2017 г в 15 часов 16 минут. Энерговыделение в активной зоне реактора составило 32,5 МДж.

Все образцы (топливные таблетки и порошкообразные препараты) измерялись на расстоянии 92,4 мм от крышки детектора. Время экспозиции при измерениях спектров таблеток Т1 и Т2 составило 1400 с. В таблице 3 представлены средние значения площади ППП с энергиями 756 и 1596 кэВ, рассчитанные по результатам шести измерений спектров топливных таблеток.

Таблица 3. Результаты измерений площади ППП (таблетки)

| Образец | Дата, измерения (время измерения) | $S_{nnn}$ (756 кэВ)      | $S_{nnn}$ (1596 кэВ)     |
|---------|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Т1      | 19.09.2017 г. (14:20:00)          | $3,00 \cdot 10^3$ (1,2)  | $8,805 \cdot 10^3$ (0,7) |
| Т2      | 19.09.2017 г. (9:05:00)           | $2,955 \cdot 10^3$ (1,2) | $8,810 \cdot 10^3$ (0,7) |

В таблице 4 представлены средние значения площади ППП с энергиями 756 и 1596 кэВ, полученные по результатам измерения спектров порошкообразных препаратов. Время экспозиции для всех измерений составило 7000 с.

Таблица 4. Результаты измерений площади ППП (порошкообразные препараты)

| Образец | Дата, измерения (время измерения) | $S_{nnn}$ (756 кэВ) | $S_{nnn}$ (1596 кэВ) |
|---------|-----------------------------------|---------------------|----------------------|
| П11     | 19.09.2017 г. (11:20:00)          | $1,03 \cdot 10^4$   | $2,560 \cdot 10^4$   |
| П12     | 19.09.2017 г. (14:30:00)          | $2,21 \cdot 10^4$   | $5,590 \cdot 10^4$   |
| П21     | 20.09.2017 г. (9:00:00)           | $1,10 \cdot 10^4$   | $2,858 \cdot 10^4$   |
| П22     | 20.09.2017 г. (11:30:00)          | $2,16 \cdot 10^4$   | $5,573 \cdot 10^4$   |

В таблицах 5 и 6 представлены значения коэффициентов, удельного числа делений и энерговыделения в таблетках, рассчитанные по результатам измерений скорости счета в ППП с энергиями 756 и 1596 кэВ изотопов <sup>95</sup>Zr и <sup>140</sup>La.

В таблицах 7 и 8 представлены значения поправочных коэффициентов, удельного числа делений и энерговыделения в порошке, рассчитанные по результатам измерений скорости счета в ППП с энергиями 756 и 1596 кэВ изотопов <sup>95</sup>Zr и <sup>140</sup>La.

*Таблица 5. Результаты расчета числа делений  
по изотопу  $^{140}\text{La}$  (топливные таблетки)*

| Образец | $K_g$ | $K_{sp}$ | Удельное число делений/г | Удельное энерговыделение Q, кДж/г |
|---------|-------|----------|--------------------------|-----------------------------------|
| T1      | 1,097 | 1,317    | $1,51 \cdot 10^{12}$     | $4,29 \cdot 10^{-2}$              |
| T2      | 1,097 | 1,317    | $1,48 \cdot 10^{12}$     | $4,24 \cdot 10^{-2}$              |

*Таблица 6. Результаты расчета числа делений  
по изотопу  $^{95}\text{Zr}$  (топливные таблетки)*

| Образец | $K_g$ | $K_{sp}$ | Удельное число делений/г | Удельное энерговыделение Q, кДж/г |
|---------|-------|----------|--------------------------|-----------------------------------|
| T1      | 1,097 | 1,667    | $1,50 \cdot 10^{12}$     | $4,28 \cdot 10^{-2}$              |
| T2      | 1,097 | 1,667    | $1,48 \cdot 10^{12}$     | $4,23 \cdot 10^{-2}$              |

*Таблица 7. Результаты расчета числа делений  
по измерению активности изотопа  $^{140}\text{La}$   
(порошкообразные препараты)*

| Образец | $K_g$  | $K_{sp}$ | Удельное число делений/г | Удельное энерговыделение Q, кДж/г |
|---------|--------|----------|--------------------------|-----------------------------------|
| П11     | 1,0077 | 1,0197   | $1,50 \cdot 10^{12}$     | $4,28 \cdot 10^{-2}$              |
| П12     | 1,018  | 1,044    | $1,50 \cdot 10^{12}$     | $4,26 \cdot 10^{-2}$              |
| П21     | 1,0090 | 1,032    | $1,49 \cdot 10^{12}$     | $4,24 \cdot 10^{-2}$              |
| П22     | 1,018  | 1,044    | $1,48 \cdot 10^{12}$     | $4,22 \cdot 10^{-2}$              |

*Таблица 8. Средние значения числа делений  
в порошке по  $^{95}\text{Zr}$*

| Образец | $K_g$  | $K_{sp}$ | Удельное число делений/г | Удельное энерговыделение Q, кДж/г |
|---------|--------|----------|--------------------------|-----------------------------------|
| П11     | 1,0077 | 1,038    | $1,50 \cdot 10^{12}$     | $4,28 \cdot 10^{-2}$              |
| П12     | 1,018  | 1,086    | $1,48 \cdot 10^{12}$     | $4,24 \cdot 10^{-2}$              |
| П21     | 1,0090 | 1,042    | $1,49 \cdot 10^{12}$     | $4,26 \cdot 10^{-2}$              |
| П22     | 1,018  | 1,086    | $1,49 \cdot 10^{12}$     | $4,26 \cdot 10^{-2}$              |

Среднее значение энерговыделения, определенное в порошкообразных препаратах, приготовленных из таблетки Т3 по измерению активности изотопа

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Брисман Б.А., Генералов В.В., Крамер-Агеев Е.А., Трошин В.С. Внутрореакторная дозиметрия. Практическое руководство. М. Энергоиздат. 1985.
2. Определение удельного энерговыделения (тепловыделения) в топливных детекторах при проведении испытаний на реакторах ИГР и ИВГ.1М. Методические рекомендации / Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК. – Курчатов, 05.09.2017 – Инв. № К54099.
3. Медетбеков Б.С. Расчетно-экспериментальное определение скорости делений ядер  $^{235}\text{U}$  нейтронами по измеренной активности радионуклидов - продуктов деления – журнал «Вестник НЯЦ РК», 2017. Выпуск 2.
4. Медетбеков Б.С. Экспериментальные исследования с целью определения скорости делений ядер  $^{235}\text{U}$  по измеренной активности различных радионуклидов - продуктов деления. – 11-я Международная конференция «Ядерная и радиационная физика», Алматы, 12 - 15 сентября 2017 г.
5. Схема распада радионуклидов. Энергия и интенсивность излучения: Публикация 38 МКРЗ. в 2-х ч.: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1987.
6. Беляков В.В, Горбатов А.Н. Грознов В.Н. в сб.: Методики радиационных исследований на стенде / Под редакцией Маргулиса У.Я. (ответственный редактор), Грознова В.Н. и др. М. 1985
7. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива: Справочник/ В. М. Колобашкин, П. М. Рубцов, П. А. Ружанский, В. Д. Сидоренко. – М.: Энергоатомиздат. 1983. – 384 с.

па  $^{140}\text{La}$  составило 42,7 Дж/г. Аналогичное значение для таблетки Т2 составило 42,3 Дж/г.

Среднее значение числа делений, определенное в порошкообразных препаратах, приготовленных из таблетки Т1 по измерению активности изотопа  $^{95}\text{Zr}$  составило 42,92 Дж/г. Аналогичное значение для таблетки Т2 составило 42,48 Дж/г.

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

При проведении исследований были измерены две топливные таблетки и четыре порошкообразных препарата. При определении площади пиков полного поглощения изотопов  $^{95}\text{Zr}$  и  $^{140}\text{La}$  в спектрах излучения образцов был использован метод многократных измерений. Как видно из таблиц 5 и 7 (лантан), а также таблиц 6 и 8 (цирконий) значения среднего числа делений, определенные для «толстых» образцов (таблетки) и «тонких» образцов (порошкообразные препараты), практически совпадают. Значения энерговыделения, определенные в «тонких» и «толстых» образцах отличаются менее чем на 1 %.

Результаты исследований, таким образом, подтверждают правильность выбора методики расчета поправочных коэффициентов на геометрию измерений и на самопоглощение гамма-квантов как в «тонких», так и в «толстых» образцах.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены физические исследования, целью которых являлась проверка инженерной методики расчетов поправочного коэффициента на самопоглощение гамма-квантов с энергиями 756 и 1596 кэВ в облученных образцах из диоксида урана. Показана правильность выбора инженерной методики расчета поправочных коэффициентов на самопоглощение при гамма-спектрометрическом определении числа делений в «толстых» образцах с долей поглощенных гамма-квантов до 40 %.

**УРАНДЫ ДИОКСИДТІҢ «ҚАЛЫҢ» ҮЛГІЛЕРІН СПЕКТРОМЕТРЛІК ӨЛШЕУЛЕР КЕЗІНДЕ  
ГАММА-КВАНТТАРДЫҢ ӨЗДІГІНЕН ЖҰТЫЛУНА КОЭФФИЦИЕНТТЕРДІ ЕСЕПТЕУДІҢ  
ИНЖЕНЕРЛЕРЛІК ӘДІСТЕМЕСІН ЭКСПЕРИМЕНТТІ ТҮРДЕ ТЕКСЕРУ**

**Д.В. Жмук, Б.С. Медетбеков, Ю.А. Попов**

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

Осы жұмыс ИГР және ИВГ.1М реакторларында сынау кезінде сәулеленген отындық детекторларда энергия бөлуді реактордан кейінгі анықтау кезінде сәулеленген отын детекторларында гамма-кванттардың өздігінен жұтылуына түзету коэффициенттерін есептеу әдістемесін экспериментті түрде тексеруге арналған.

Мақалада «қалың» үлгілерде және «жұқа» ұнтақ тәрізді препараттарда бөліну санын гамма-спектрометриялық әдісімен анықтау бойынша зерттеулердің нәтижелері берілген. Отын таблеткалары мен ұнтақ тәрізді препараттардағы бөліну санын анықтау нәтижелерінің салыстырмалы талдауы келтірілген, осылардың негізінде «қалың» үлгілердегі гамма-кванттық өздігінен жұтылуға түзету коэффициенттерін есептеудің инженерлік әдістемесін таңдаудың дұрыстығы құпталды.

**EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE ENGINEERING METHOD OF CALCULATION  
OF COEFFICIENTS ON SELF-ABSORPTION OF GAMMA-QUANTS FOR SPECTROMETRIC  
MEASUREMENTS OF «THICK» SAMPLES FROM URANIUM DIOXIDE**

**D.V. Zhmuk, B.S. Medetbekov, Y.A. Popov**

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

The present work is aimed to verification of the methodology designed to determine the energy release (heat release) in fuel detectors irradiated in tests at IGR and IVG.1M reactors.

The paper presents the results of physical studies, when carrying out studies of thick uranium samples and fine powders from uranium dioxide where the energy release and the specific number of fissions were calculated. In the same way, the mass absorption coefficients of gamma quanta with energies of 756 and 1596 keV in uranium dioxide were determined. As a result, a comparative analysis of the correction factors for self-absorption and geometry for fuel pellets and powder preparations was made on the basis of which the correctness of the choice of this methodology for calculating the energy release.

УДК 658.012.011.56:658:512

### ТРЕТИЙ ЭТАП МОДЕРНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ИВГ.1М

Коровиков А.Г., Ильиных С.А., Ермаков В.А., Серикбаев Б.С.

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

С 2010 года и по настоящее время в филиале «Институт атомной энергии» РГП Национальный ядерный центр Республики Казахстан (далее филиал ИАЭ) проводятся работы по модернизации информационно-измерительной системы (ИИС) исследовательского реактора ИВГ.1М. В рамках первых двух этапов с 2012 по 2017 годы проведена работа по модернизации ИИС системы автоматического управления (САУ), системы управления и защиты (СУЗ) и системы контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА). Приобретено оборудование, программное обеспечение и материалы. Разработаны алгоритмы обработки данных от первичных преобразователей и экраны представления информации операторам пультов. Выполнен монтаж оборудования, и проведены пуско-наладочные работы. В 2018 году в рамках проекта технической кооперации между МАГАТЭ и Республикой Казахстан проводится третий этап модернизации, в рамках которого планируется осуществить модернизацию ИИС контроля герметичности оболочек (КГО) и ИИС дозиметрического контроля (ДК). В результате данной работы будет усовершенствован процесс контроля, регистрации и отображения экспериментальной информации систем КГО и ДК.

#### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в РК эксплуатируется три реакторных установки с исследовательскими реакторами, и одна находится в режиме длительного останова. В качестве технических средств вычислительных комплексов информационно-измерительных систем (ИИС) реакторных установок используются физически и морально изношенные аппаратные комплексы, используется морально устаревшее программное обеспечение, которые не могут реализовать функцию обеспечения безопасности ядерного реактора.

Актуальность определяется важностью ИИС для реализации функций обеспечения безопасности любого ядерного реактора, включая реактор ИВГ.1М. Наличие точной оперативной информации о работе реактора является одним из важнейших условий разумной и адекватной реакции операторов и систем автоматического регулирования на любые ситуации, возникающие как в условиях нормальной эксплуатации, так и в аварийных ситуациях.

В период с 2012 по 2017 года проведены первые два этапа модернизации. В рамках первого этапа были модернизированы ИИС САУ и ИИС СУЗ. Вторым этапом была проведена модернизация ИИС КИПиА. модернизированные системы была разработана эксплуатационная документация [1, 2], ИИС введены в опытную эксплуатацию и на данный момент сбой в работе данных систем не зафиксированы.

Третьим этапом запланирована модернизация ИИС КГО и ИИС ДК.

Целью данной работы является модернизация ИИС КГО и ИИС ДК реактора ИВГ.1М путем применения современного оборудования и программного обеспечения.

Объект исследования является ИИС исследовательского реактора ИВГ.1М, в части подсистем кон-

троля герметичности оболочек (СКГО) и дозиметрического контроля (ДК).

#### ПЕРВЫЕ ЭТАПЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ИИС

В 1985 году была завершена последняя модернизация ИИС ИВГ.1М, в рамках данной модернизации были применены терминалы на базе 16-разрядных машин: диалоговый вычислительный комплекс (ДВК), агрегатная система средств вычислительной техники (АСВТ-М), терминал вычислительной связи с объектом (СМ-1634). Это семейство советских персональных компьютеров середины 80-х – начала 90-х годов XX века. В качестве операционной системы применялась агрегатная система программного обеспечения (АСПО). С течением времени встал вопрос о дальнейшей эксплуатации данного оборудования, так как сложно найти запасные части для восстановления работоспособности данного оборудования и уменьшается число персонала, способного устранять возникшие неполадки. Поэтому было принято решение о модернизации ИИС ИВГ.1М [3].

Во время опытной эксплуатации, модернизированные на первых двух этапах ИИС показали значительное превосходство над устаревшими системами [2]:

- *быстродействие*. За счет применения современного оборудования и программного обеспечения, производства компании *Allen Bradley*, достигнута частота опроса всех ИК системы 50 Гц и скорость регистрации данных на АРМ – 10 Гц. Данный показатель более чем в 10 раз превышает показатели устаревших ИИС исследовательского реактора ИВГ.1М;

- *надежность*. Разработанные ИИС системы обладают высокой надежностью, за счет применения основного оборудования, обладающего высокими показателями наработки на отказ (MTBF), например, показатель MTBF контроллера системы состав-

ляет 815822 часов или средняя продолжительность работы устройства между ремонтами около 93 лет. Расчет свидетельствует о том, что вероятность того, что системы САУ, СУЗ и КИПиА окажутся в работоспособном состоянии более 99,99 % и соответствует ГОСТ. В свою очередь в старых системах использовалось морально устаревшее оборудование середины 80-х – начала 90-х годов XX века, для которого сложно найти запасные части и уменьшается число персонала способного с ним работать;

– *удобство использования.* Предложенные методы отображения информации (SCADA-система, станции операторов, местные пульта, экран коллективного пользования на базе жидкокристаллического телевизора), за счёт более гибкой структуры и централизации источника информации для локальных пультов операторов и экрана коллективного

пользования, предоставляет функциональный инструмент организации экспериментальной информации в различных режимах эксплуатации реакторной установки и позволяет наращивать и модернизировать систему с сохранением базовых принципов эффективности. Разработанные в SCADA-системе экраны операторов обеспечивают удобный просмотр и обладают большой информационной емкостью. Все данные регистрируются в цифровом виде, что упрощает дальнейшую их обработку.

Для выполнения требований Закона Республики Казахстан № 53-ІІ от 7 июня 2000 года «Об обеспечении единства измерений» (с изменениями и дополнениями по состоянию на 29.10.2015 г.) применено оборудование и первичные преобразователи, входящие в Реестр государственной системы обеспечения единства измерений Республики Казахстан.

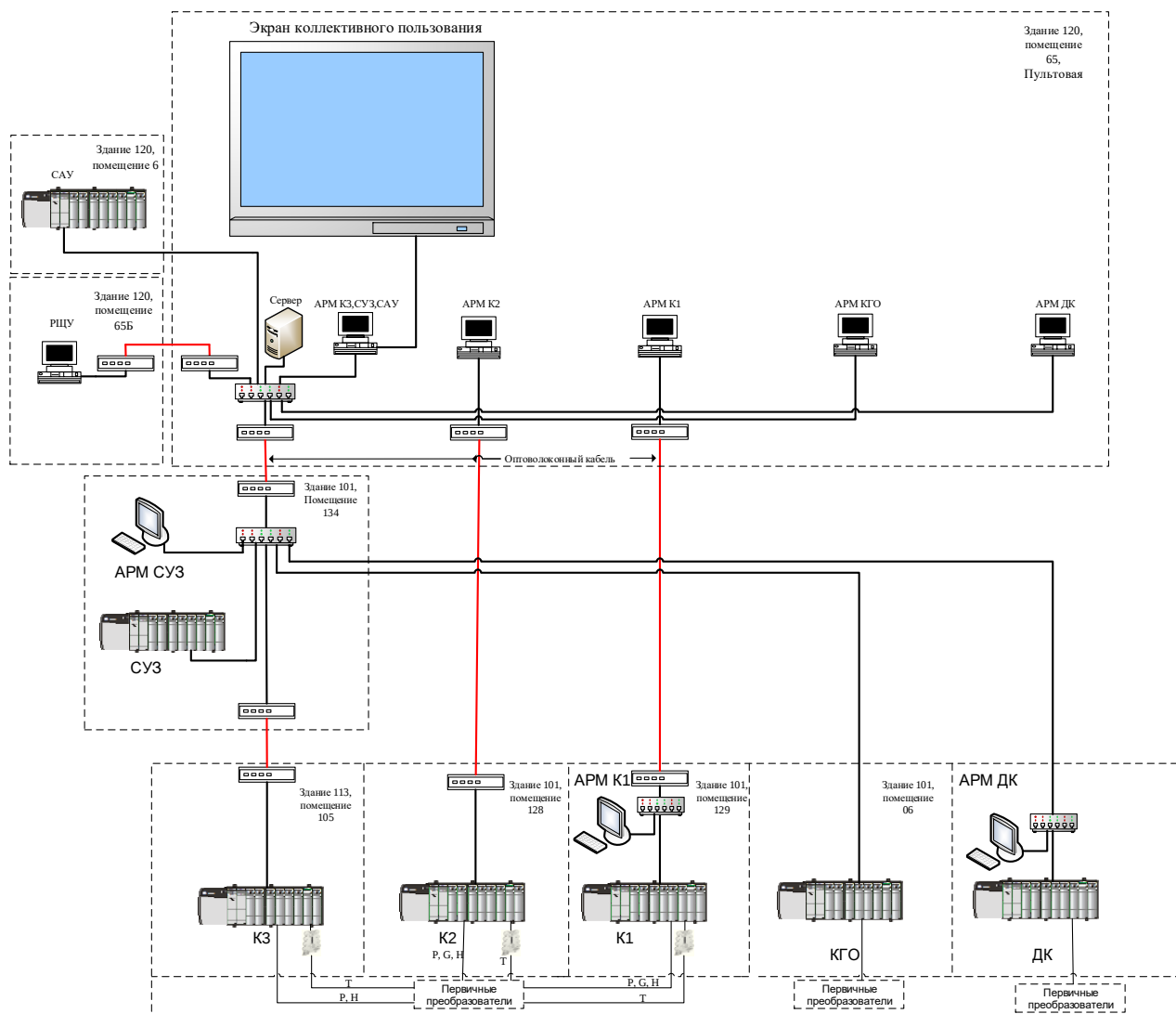


Рисунок 1. Структурная схема ИИС ИВГ.1М

### ТРЕТИЙ ЭТАП МОДЕРНИЗАЦИИ ИИС

В 2018 году в рамках проекта технической кооперации между МАГАТЭ и Республикой Казахстан

проводятся работы по модернизации ИИС КГО и ИИС ДК.

ИИС КГО предназначена для:

– управления режимами отбора теплоносителя из водоохлаждаемых технологических каналов (ВОТК);

– сбора, обработки и отображения информации об активности теплоносителя, зависящей от состояния оболочек ТВЭЛОВ ВОТК.

Существующая ИИС КГО построена по иерархическому принципу. Ядром системы является управляющий вычислительный комплекс УВК-07 (рисунок 2), предназначенный для сбора и обработки информации, формирования управляющих воздействий и передачи данных по выбранному каналу связи. Вывод оперативной информации производится на монитор «Электроника МС 0507», результаты регистрации измерений выводятся на бумажный носитель.



Рисунок 2. Внешний вид управляющего вычислительного комплекса УВК-07

В состав ИИС КГО входят следующие первичные преобразователи:

- датчики давления (ДДМ) – 30 шт.;
- датчик расхода (Сапфир-22 ДД) – 1 шт.;
- датчики измерения мощности экспозиционной дозы гамма-излучения (БДРС-01П2) – 30 шт.

ИИС ДК разработана и внедрена в эксплуатацию в 1987 году. Областью использования ИИС ДК является обеспечение мер радиационной безопасности при работах на реакторной установке, а также контроль радиационной обстановки в помещениях во время проведения подготовительных и экспериментальных работ по следующим параметрам: гамма-излучение, эквивалентная доза нейтронов, бета-активные газы.

Существующая система дозиметрического контроля реализована на основе аналоговых преобразователей АСВТ-М (рисунок 3) и ЭВМ типа ДВК-3 (рисунок 4). Вывод оперативной информации производится на монитор ДВК-3, результаты регистрации измерений выводятся на бумажный носитель.



Рисунок 3. Внешний вид аналоговых преобразователей АСВТ-М



Рисунок 4. Внешний вид ЭВМ типа ДВК-3

В состав ИИС ДК входят следующие первичные преобразователи:

- датчики мощности дозы гамма-излучения (ДГ-2) – 14 шт.;
- датчики мощности дозы гамма-излучения (ДГ-7) – 6 шт.;
- датчики мощности дозы гамма-излучения (ДГ-15) – 3 шт.;
- датчик эквивалентной дозы нейтронов (УДБН-02Р) – 1 шт.;
- датчики объемной активности бета-активных газов (ДБГ-2) – 16 шт.

Особенностью ИИС ДК по отношению к ИИС КИПиА, ИИС СУЗ и ИИС КГО является импульсный выход первичных преобразователей, т.е. на выходе преобразователя формируется сигнал в виде набора импульсов, который после подсчета в единицу времени по индивидуальной зависимости для каждого преобразователя пересчитывается в физическую величину. В связи с этим, в качестве вторичных преобразователей впервые в рамках создания ИИС

ИВГ.1М, были выбраны двухканальные счетчики импульсов 1756-HSC.

Обе системы реализованы в виде двухуровневых структур (рисунок 5, 6), где на нижнем уровне расположен контроллер, который собирает показания со всех датчиков ИИС и передает их на верхний уровень. Верхний уровень представляет собой АРМ оператора, на котором отображаются все значения измеряемых параметров и ведется их регистрация. Основные технические характеристики ИИС КГО и ИИС ДК представлены в таблице 1.

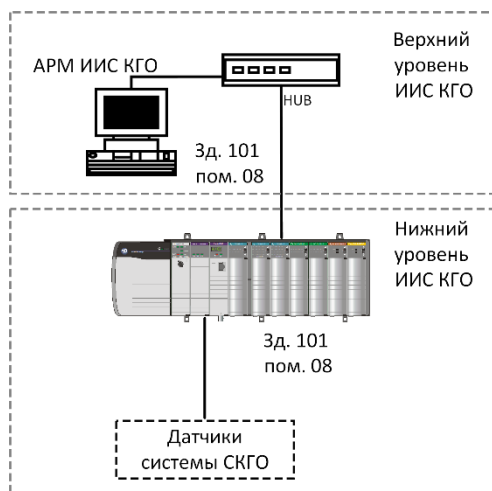


Рисунок 5. Структура ИИС КГО

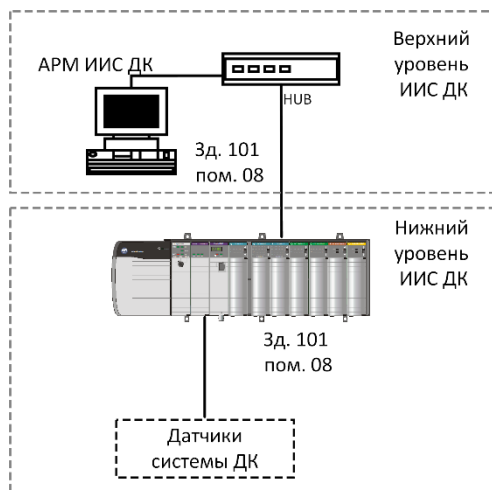


Рисунок 6. Структура ИИС ДК

Как и в уже модернизированных ИИС, в качестве средства программирования контроллеров выбран программный продукт RSLogix 5000, производитель Rockwell Automation, США. Выбор обусловлен тем, что RSLogix 5000 поддерживает архитектуру ControlLogix и позволяет провести программирование контроллера ControlLogix серии 1756. Программное обеспечение АРМ ИИС КГО и ИИС ДК разработано в SCADA системе RSView32 производства компании Rockwell Automation.

Таблица 1. Технические характеристики ИИС КГО и ИИС ДК

| Наименование ИИС                      | КГО | ДК  |
|---------------------------------------|-----|-----|
| Количество контроллеров               | 1   | 1   |
| Количество каналов аналогового ввода  | 61  | 40  |
| Количество каналов дискретного ввода  | –   | –   |
| Количество каналов дискретного вывода | 3   | –   |
| Количество каналов регистрации        | 61  | 40  |
| Период регистрации на контроллерах, с | 0,1 | 0,1 |

Для настройки сетевого взаимодействия между контроллером и АРМ оператора в ИИС, выбран драйвер прямых связей RSLinx, который позволяет использовать связи на основе наиболее распространенной технологии OPC.

Технология OPC определяет 2 класса программ: OPC-сервер (OPC контроллера), непосредственно взаимодействующий с контроллером, и OPC-клиент (OPC АРМ оператора), получающий данные от OPC-сервера для дальнейшей обработки и передающий в OPC-сервер команды управления.

Взаимодействие модулей ПО ИИС КГО и ИИС ДК представлено на рисунке 7.

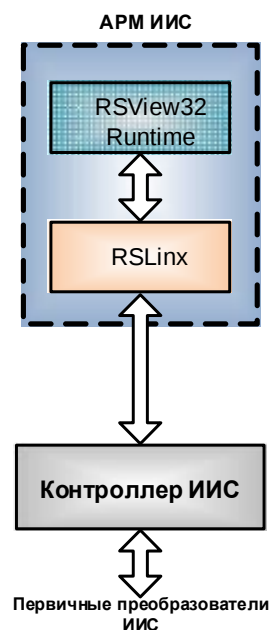


Рисунок 7. Взаимодействие ПО ИИС

Для каждого АРМ оператора разработана своя мнемосхема. Мнемосхемы всех ИИС имеют общую структуру. В верхней части экрана отображается текущие дата и время, режим работы системы, название мнемосхемы, имя текущего оператора и наличие связи с контроллерами систем. Переход между мнемосхемами осуществляется с помощью панели навигации.

# ТРЕТИЙ ЭТАП МОДЕРНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ИВГ.1М

| СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ                         |       |                                                                    |             |                       |          |                                    |             |                       |                              |
|----------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------|----------|------------------------------------|-------------|-----------------------|------------------------------|
| ОПЕРАТОР<br>DEFAULT                                      |       | ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА<br>РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ИВГ.1М |             | СВЯЗЬ С КОНТРОЛЛЕРАМИ |          | 30 марта 2018 г.<br>15:45:42       |             |                       |                              |
| ТЕХНОЛОГИЯ                                               |       | МОЩНОСТЬ ЭКСПОЗИЦИОННОЙ ДОЗЫ (МЭД)                                 |             | Давление каналов      |          | МОЩНОСТЬ ЭКСПОЗИЦИОННОЙ ДОЗЫ (МЭД) |             | Давление каналов      |                              |
| НАЧАЛЬНИК СМЕРИ                                          | КАНАЛ | Контрольная точка                                                  | Тип датчика | Диагностика измерений | МЭД, мРч | Контрольная точка                  | Тип датчика | Диагностика измерений | Давление, кг/см <sup>2</sup> |
| ФИЗИКИ                                                   | 1     | ГД.1                                                               | БДРС-01П2   | 0.3-10 <sup>2</sup>   | 21,70    | ДПР.01.3                           | ДДМ         | 0-15                  | 8,35                         |
| КИПИА                                                    | 2     | ГД.2                                                               | БДРС-01П2   | 0.3-10 <sup>2</sup>   | 21,70    | ДПР.02.3                           | ДДМ         | 0-15                  | 8,25                         |
| САУ                                                      | 3     | ГД.3                                                               | БДРС-01П2   | 0.3-10 <sup>2</sup>   | 21,70    | ДПР.03.3                           | ДДМ         | 0-15                  | 8,52                         |
| СУЗ                                                      | 4     | ГД.4                                                               | БДРС-01П2   | 0.3-10 <sup>2</sup>   | 21,70    | ДПР.04.3                           | ДДМ         | 0-15                  | 8,49                         |
| СКГО                                                     | 5     | ГД.5                                                               | БДРС-01П2   | 0.3-10 <sup>2</sup>   | 21,70    | ДПР.05.3                           | ДДМ         | 0-15                  | 8,54                         |
| ДОЗ. КОНТРОЛЬ                                            | 6     | ГД.6                                                               | БДРС-01П2   | 0.3-10 <sup>2</sup>   | 21,70    | ДПР.06.3                           | ДДМ         | 0-15                  | 8,52                         |
| ТРЕВОГИ                                                  | 7     | ГД.7                                                               | БДРС-01П2   | 0.3-10 <sup>2</sup>   | 21,70    | ДПР.07.3                           | ДДМ         | 0-15                  | 8,56                         |
| ГРАФИКИ                                                  | 8     | ГД.8                                                               | БДРС-01П2   | 0.3-10 <sup>2</sup>   | 21,70    | ДПР.08.3                           | ДДМ         | 0-15                  | 8,54                         |
| На Главную                                               | 9     | ГД.9                                                               | БДРС-01П2   | 0.3-10 <sup>2</sup>   | 21,70    | ДПР.09.3                           | ДДМ         | 0-15                  | 8,42                         |
| ПВР КГО                                                  | 10    | ГД.10                                                              | БДРС-01П2   | 0.3-10 <sup>2</sup>   | 21,70    | ДПР.10.3                           | ДДМ         | 0-15                  | 8,62                         |
| РЕГИСТРАЦИЯ                                              | 11    | ГД.11                                                              | БДРС-01П2   | 0.3-10 <sup>2</sup>   | 21,70    | ДПР.11.3                           | ДДМ         | 0-15                  | 8,43                         |
| ВЫКЛЮЧЕНИЕ                                               | 12    | ГД.12                                                              | БДРС-01П2   | 0.3-10 <sup>2</sup>   | 21,70    | ДПР.12.3                           | ДДМ         | 0-15                  | 8,44                         |
|                                                          | 13    | ГД.13                                                              | БДРС-01П2   | 0.3-10 <sup>2</sup>   | 21,70    | ДПР.13.3                           | ДДМ         | 0-15                  | 8,37                         |
|                                                          | 14    | ГД.14                                                              | БДРС-01П2   | 0.3-10 <sup>2</sup>   | 21,70    | ДПР.14.3                           | ДДМ         | 0-15                  | 8,38                         |
|                                                          | 15    | ГД.15                                                              | БДРС-01П2   | 0.3-10 <sup>2</sup>   | 21,70    | ДПР.15.3                           | ДДМ         | 0-15                  | 8,48                         |
|                                                          | 16    | ГД.16                                                              | БДРС-01П2   | 0.3-10 <sup>2</sup>   | 21,70    | ДПР.16.3                           | ДДМ         | 0-15                  | 8,48                         |
| Параметры канала КГО на сливе: Д.40.00, кг/с 0,00        |       |                                                                    |             |                       |          |                                    |             |                       |                              |
| Уставка ПС дозы от мощности: 1 МВт, 3 МВт, 6 МВт, 10 МВт |       |                                                                    |             |                       |          |                                    |             |                       |                              |
| Текущий: Страница: Все: Без звука: Фильтр:               |       |                                                                    |             |                       |          |                                    |             |                       |                              |

Рисунок 8. Мнемосхема ИИС КГО

СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

ОПЕРАТОР  
DEFAULT

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА  
РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ИВГ.1.М

СВЯЗЬ С КОНТРОЛЛЕРАМИ

SAV

SCS

IA11

IA12

IA13

DK

SCGO

30 марта 2018 г.  
15:38:02

ТЕХНОЛОГИЯ

НАЧАЛЬНИК СМЕРИ

ФИЗИКИ

КИПИА

САУ

СУЗ

СКГО

ДОЗ. КОНТРОЛЬ

ТРЕВОГИ

СОБЫТИЯ

ГРАФИКИ

На Главную

РЕГИСТРАЦИЯ

ВКЛЮЧИТЬ

ОТКЛЮЧИТЬ

МОЩНОСТЬ ДОЗЫ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

| Контрольная точка | Тип ПП | Диапазон измерения (офс.)         | Выходной сигнал ПП В | Погрешность ПП % |
|-------------------|--------|-----------------------------------|----------------------|------------------|
| ДКН ДВ-6          | ДГ-2   | 0.3-10 <sup>2</sup>               | 0,2                  | 20               |
| ДКН Т-120         | ДГ-2   | 0.3-10 <sup>2</sup>               | 0,2                  | 20               |
| ДКН Т-140         | ДГ-7   | 10-10 <sup>4</sup>                | 0,2                  | 20               |
| ДКН 102-02        | ДГ-2   | 0.3-10 <sup>2</sup>               | 0,2                  | 20               |
| ДКН ХП Т          | ДГ-2   | 0.3-10 <sup>2</sup>               | 0,2                  | 20               |
| ДКН 357           | ДГ-2   | 0.3-10 <sup>2</sup>               | 0,2                  | 20               |
| ДКН 010-03        | ДГ-7   | 10-10 <sup>4</sup>                | 0,2                  | 25               |
| ДКН Н-03          | ДГ-7   | 10-10 <sup>4</sup>                | 0,2                  | 25               |
| ДКН 08            | ДГ-2   | 0.3-10 <sup>2</sup>               | 0,2                  | 20               |
| ДКН 200           | ДГ-2   | 0.3-10 <sup>2</sup>               | 0,2                  | 20               |
| ДКН Н-02          | ДГ-15  | 10 <sup>2</sup> - 10 <sup>4</sup> | 0,2                  | 20               |
| ДКН Н-01          | ДГ-7   | 10-10 <sup>4</sup>                | 0,2                  | 25               |
| ДКН-КРАН          | ДГ-2   | 0.3-10 <sup>2</sup>               | 0,2                  | 20               |
| ДКН 010-04        | ДГ-15  | 10 <sup>2</sup> - 10 <sup>4</sup> | 0,2                  | 20               |
| ДКН 130-01        | ДГ-2   | 0.3-10 <sup>2</sup>               | 0,2                  | 20               |
| ДКН 010-01        | ДГ-7   | 10-10 <sup>4</sup>                | 0,2                  | 25               |
| ДКН 118           | ДГ-2   | 0.3-10 <sup>2</sup>               | 0,2                  | 20               |
| ДКН 200А          | ДГ-2   | 0.3-10 <sup>2</sup>               | 0,2                  | 20               |
| ДКН 138           | ДГ-2   | 0.3-10 <sup>2</sup>               | 0,2                  | 20               |
| ДКН 010-02        | ДГ-15  | 10 <sup>2</sup> - 10 <sup>4</sup> | 0,2                  | 20               |
| ДКН 130-02        | ДГ-2   | 0.3-10 <sup>2</sup>               | 0,2                  | 20               |
| ДКН 09-01         | ДГ-7   | 10-10 <sup>4</sup>                | 0,2                  | 20               |
| СКН 130           | ДГ-2   | 0.3-10 <sup>2</sup>               | 0,2                  | 20               |

КОНЦЕНТРАЦИЯ БЕТА-АКТИВНЫХ ГАЗОВ

| Контрольная точка | Тип ПП | Диапазон измерения (офс.)          | Выходной сигнал ПП В | Погрешность ПП % |
|-------------------|--------|------------------------------------|----------------------|------------------|
| ДГЕ-09            | ДБГ-2  | 5-10 <sup>16</sup> 10 <sup>3</sup> | 0,2                  | 30               |
| ДГЕ-07-02         | ДБГ-2  | 5-10 <sup>16</sup> 10 <sup>3</sup> | 0,2                  | 30               |
| ДГЕ-010           | ДБГ-2  | 5-10 <sup>16</sup> 10 <sup>3</sup> | 0,2                  | 30               |
| ДГЕ-21            | ДБГ-2  | 5-10 <sup>16</sup> 10 <sup>3</sup> | 0,2                  | 30               |
| ДГЕ-23-02         | ДБГ-2  | 5-10 <sup>16</sup> 10 <sup>3</sup> | 0,2                  | 30               |
| ДГЕ-34-02         | ДБГ-2  | 5-10 <sup>16</sup> 10 <sup>3</sup> | 0,2                  | 30               |
| ДГЕ-34            | ДБГ-2  | 5-10 <sup>16</sup> 10 <sup>3</sup> | 0,2                  | 30               |
| ДГЕ-122           | ДБГ-2  | 5-10 <sup>16</sup> 10 <sup>3</sup> | 0,2                  | 30               |
| ДГЕ-138-02        | ДБГ-2  | 5-10 <sup>16</sup> 10 <sup>3</sup> | 0,2                  | 30               |
| ДГЕ-Н-02          | ДБГ-2  | 5-10 <sup>16</sup> 10 <sup>3</sup> | 0,2                  | 30               |
| ДГЕ-118-02        | ДБГ-2  | 5-10 <sup>16</sup> 10 <sup>3</sup> | 0,2                  | 30               |
| ДГЕ-131-Н-02      | ДБГ-2  | 5-10 <sup>16</sup> 10 <sup>3</sup> | 0,2                  | 30               |
| СКЕ-138-01        | ДБГ-2  | 5-10 <sup>16</sup> 10 <sup>3</sup> | 0,2                  | 30               |
| СКЕ-138-02        | ДБГ-2  | 5-10 <sup>16</sup> 10 <sup>3</sup> | 0,2                  | 30               |
| СКЕ-138-03        | ДБГ-2  | 5-10 <sup>16</sup> 10 <sup>3</sup> | 0,2                  | 30               |
| СКЕ-138-04        | ДБГ-2  | 5-10 <sup>16</sup> 10 <sup>3</sup> | 0,2                  | 30               |

МОЩНОСТЬ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ДОЗЫ НЕЙТРОНОВ

| Контрольная точка | Тип ПП    | Диапазон измерения (офс.)             | Выходной сигнал ПП В | Погрешность ПП % |
|-------------------|-----------|---------------------------------------|----------------------|------------------|
| ДКН Н-04          | УДЕН -02Р | 3-10 <sup>3</sup> - 3-10 <sup>4</sup> | 0,2                  | 5                |

Текущий

Страница

Все

Без звука

Фильтр

Рисунок 9. Мнемосхема ИИС ДК

На рисунке 8 показана мнемосхема оператора КГО. Мнемосхема выполнена в виде таблиц. Предусмотрены предупредительные сигналы по превышению заданных уставок, которые рассчитаны для различных мощностей реактора. Выбор мощности осуществляется в нижней левой части экрана. При превышении значением канала заданной уставки, ячейка, на которой отображается физическое значение, выделяется желтым цветом.

Мнемосхема оператора системы ДК разделена на три таблицы в соответствии с типами измерений первичных преобразователей (мощность дозы гамма-излучения, объемная активность бета-активных газов и мощность эквивалентной дозы нейтронов) (рисунок 9). Предусмотрены предупредительные сигналы по превышению заданных уставок, при

превышении значением канала заданной уставки, ячейка, на которой отображается физическое значение, выделяется желтым цветом.

Регистрация данных осуществляется на АРМ ИИС КГО и ИИС ДК, расположенных на верхнем уровне системы (рисунок 5, 6), частота регистрации для данных систем составляет 1 Гц, в случае необходимости оператор может увеличить частоту регистрации до 10 Гц.

Обработка экспериментальных данных осуществляется с помощью внешнего приложения, которое формирует файл в виде электронных таблиц с заранее заданными параметрами (период регистрации, номера каналов и т.д.).

## Выводы

В настоящее время на реакторе ИВГ.1М проводится важная и нужная работа по модернизации ИИС реактора. В связи с моральным и физическим износом существующего оборудования ИИС, производится замена модулей ввода вывода, контроллеров, АРМ и систем бесперебойного питания при неизменных первичных преобразователях. Выполненные работы первого и второго этапов модернизации, а затем и последующая опытная эксплуатация на протяжении более 10 пусков подтвердили правильность принятых проектных решений и удобство работы для операторов и постэкспериментальную обработку результатов.

В течение 2018 года будет завершен третий этап модернизации, который позволит ввести в опытную эксплуатацию ИИС КГО и ИИС ДК.

Особенностью данного этапа модернизации является сбор информации с датчиков, имеющих импульсный выход. В связи с этим возникла необходимость использования модулей счетчиков импульсов 1756-HSC, ранее не применяемых в ИИС ИВГ.1М.

За счет применения современного оборудования и программного обеспечения, были достигнуты большое быстродействие и надежность системы, а также обеспечена возможность наращивания системы без изменений, ранее созданных ИИС.

## Литература

1. Коровиков А.Г., Ольховик Д.А., Первый этап модернизации информационно-измерительной системы исследовательского реактора ИВГ.1М – Вестник НЯЦ РК, 2014 г., вып. 4, с. 5-12.
2. Коровиков А.Г., Ермаков В.А., Серикбаев Б.С., Второй этап модернизации информационно-измерительной системы исследовательского реактора ИВГ.1М – Вестник НЯЦ РК, 2016 г., вып.3, с. 140-146.
3. Информационно-измерительная система исследовательского реактора ИВГ.1М: технический проект АК.72500.00 – 2010 г. – Курчатов.

## ИВГ.1М ЗЕРТТЕУ РЕАКТОРЫНЫҢ АҚПАРАТТЫҚ-ӨЛШЕУ ЖҮЙЕСІН ЖАҢАРТУДЫҢ ҮШІНШІ КЕЗЕҢІ

А.Г. Коровиков, С.А. Ильных, В.А. Ермаков, Б.С. Сериков

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

2010 жылдан бастап қазіргі уақытқа дейін Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығы РМК Атом энергиясы институты» филиалында (бұдан әрі АЭИ филиалы) ИВГ.1М зерттеу реакторының ақпараттық-өлшеу жүйесін (АӨЖ) жаңарту бойынша жұмыстары жүргізіледі. 2012 жылдан 2017 жылға дейінгі алғашқы екі кезеңдердің шеңберлерінде АӨЖ, автоматтық басқару жүйелері (АБЖ), басқару және қорғау жүйелері (БҚЖ) және автоматика мен бақылау-өлшеу аспаптарының жүйелері (АжәнеБӨА) жаңарту бойынша жұмыс жүргізілді. Жабдық, бағдарламалық қамтамасыз ету және материалдар сатып алынды. Алғашқы түрлендіргіштерден деректерді өңдеу алгоритмдері және пульт операторларына ақпаратты ұсыну экрандары әзірленді. Жабдықты монтаждау орындалды және іске-қосу жөндеу жұмыстары жүргізілді. 2018 жылы АТЭХАГ және Қазақстан Республикасы арасындағы техникалық кооперация жобасының шеңберінде жаңартудың үшінші кезеңі жүргізіледі, шеңберінде дозиметрлік бақылаудың (ДБ) АӨЖ және қабықшалардың герметикалығын бақылау (ҚГБ) АӨЖ жаңартуды іске асыру жоспарлануда. Осы жұмыстың нәтижесінде ДБ және ҚГБ жүйелерінің экспериментальдық ақпаратты тіркеу және көрсету, бақылау үдерісі жетілдіріледі.

Применение SCADA системы позволило создать экраны операторов с высокими эргономическими характеристиками и большой информационной емкостью. Благодаря регистрации экспериментальных данных в цифровом виде, упрощается их обработка и дальнейшие расчеты.

В результате проделанной работы было создано программное обеспечение ИИС КГО и ИИС ДК, которое:

- позволяет проводить опрос всех каналов измерения ИИС КГО и ИИС ДК, предусмотренных проектом;
- производит преобразования значений из измеренного электрического значения канала в его физическое значение;
- осуществляет регистрацию физических и электрических значений на АРМ операторов;
- производит сравнение физических значений с уставками каналов и осуществляет цветовую индикацию при выходе за пределы;
- отображает значение каналов на мнемосхемах экрана оператора в удобном, эргономичном виде;

Таким образом, разработанная ИИС ИВГ.1М демонстрирует возможность создания и внедрения современных систем измерения и контроля на сложных и опасных объектах.

**THIRD PHASE OF INFORMATION AND MEASURING SYSTEM MODERNIZATION  
OF IVG.1M RESEARCH REACTOR**

**A.G. Korovikov, S.A. Ilyinych, V.A. Yermakov, B.S. Serikbayev.**

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

From 2010 through the present Institute of Atomic Energy Branch of the RSE National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan (IAE Branch) performs the activity for modernization of information and measuring system (IMS) of the IVG.1m Research Reactor. Within the first two phases from 2012 to 2017, modernization of automatic control system (ACS), control and protection system (CPS) and instrumentation and automated control system (I&C) of IMS system have been carried out. Equipment, software and materials have been purchased. Algorithms for data processing from primary converters and information screens for remote control operators have been developed. The equipment was installed and commissioning was performed. In 2018, within the technical cooperation project between the IAEA and the Republic of Kazakhstan, the third phase of modernization is being carried out, under which it is planned to modernize the IMS for cell sealing control (CSC) and IMS for dosimetry control (DC). Based on result of this work, the process of control, registration and displaying of experimental information of CSC and DC systems will be improved.

УДК 533.9.072

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕРМОДЕСОРБЦИОННОГО АНАЛИЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММИРУЕМОГО НАГРЕВА ОБРАЗЦОВ НА ИМИТАЦИОННОМ СТЕНДЕ С ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОЙ УСТАНОВКОЙ

Туркач А.А., Гановичев Д.А., Туленбергенев Т.Р., Соколов И.А., Ермаков В.А.

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

В данной работе представлена разработка способа программируемого линейного нагрева исследуемых образцов с заданной скоростью, с помощью управления блоком питания электронной пушки Spellman имитационного стенда с плазменно-пучковой установкой. Полученные результаты позволили оценить возможность проведения ТДС (термодесорбционного) анализа на имитационном стенде с ППУ без извлечения образцов после насыщения.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач получения надежных данных о результатах взаимодействия плазмы с материалами ТЯР является проведение методически корректных экспериментов по исследованию газовой выделения из исследуемых образцов, подвергнувшихся ионному облучению.

Для различных методик исследования газовой выделения из образцов после ионного облучения были определены основные моменты, которые влияли на качество получаемых данных. Кратко перечислим их:

Предварительное насыщение образца должно проводиться в контролируемых условиях т.е. должна быть достоверная информация об основных параметрах облучения:

- геометрия облучения;
- данные о параметрах ионного потока (плотность ионного потока, энергетический спектр ионного потока);
- данные о температуре облучаемого образца;
- данные о времени облучения.

Процедуры пост-облучательной подготовки образцов к экспериментам по газовой выделению должны быть оптимальными с точки зрения получения максимальной достоверной информации в экспериментах по газовой выделению. Согласно многочисленным исследованиям здесь оказалось важным следующее:

- время выдержки образцов после облучения до экспериментов по газовой выделению должно быть минимально возможным;
- не желателен контакт облученного образца с атмосферными газами.

Эксперименты по газовой выделению из облученных образцов должны проводиться в условиях, позволяющих корректно определить газовый поток из исследуемого образца в зависимости от его температуры.

В работе «Предварительные экспериментальные исследования термодесорбции кандидатных материалов ТЯР на имитационном стенде с ППУ» представленной на XVI конференции-конкурсе НИОКР молодых ученых и специалистов НЯЦ РК, была под-

тверждена и продемонстрирована возможность проведения термодесорбционного анализа на имитационном стенде.

В ходе проведенных работ были сформулированы важные задачи, решение которых могло бы существенно улучшить качество комплексных материаловедческих исследований на ППУ, одна из которых создание системы линейного нагрева образца электронным пучком, с целью реализации экспериментов по термодесорбции образцов в режиме линейного нагрева.

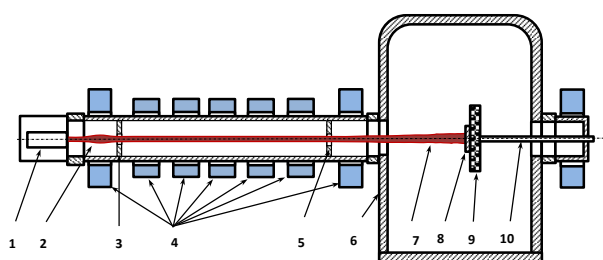
Поэтому в рамках настоящей работы были проведены экспериментальные исследования по оценке возможности осуществления термодесорбционного анализа в режиме линейного нагрева.

### 1. ОПИСАНИЕ ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОЙ УСТАНОВКИ

Основными элементами плазменно-пучковой установки, показанной на схеме рисунка 1, являются электронная пушка (плазмогенератор), камера плазменно-пучкового разряда (ППР), камера откачки плазмогенератора, труба откачки плазмогенератора, вакуумная камера взаимодействия, катушки плазмогенератора, мишенное устройство, шлюзовое устройство и камера загрузки [2].

Плазменно-пучковая установка спроектирована для получения следующих параметров плазменного потока:

- диаметр плазменного потока перед мишенью – до 30 мм;
- напряженность магнитного поля, создаваемая на оси генератора, – 0,1 Тл;
- напряженность магнитного поля в районе электронной пушки – примерно 0,02 Тл;
- величина тока в плазме – до 1 А;
- концентрация плазмы водорода и гелия в пучке диаметром 1 см –  $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ;
- электронная температура плазмы – 3–30 эВ;
- энергия ионов – 10–100 эВ;
- плотность ионного потока –  $\sim 10^{22} \text{ м}^{-2}\text{с}$ ;
- плотность теплового потока (в электронном пучке) – до 40 МВт/м<sup>2</sup>.



1 – электронная пушка; 2 – камера плазменно-пучкового разряда; 3,5 – диафрагма; 4 – электромагнитные катушки; 6 – камера взаимодействия; 7 – электронный пучок; 8 – образец; 9 – графитовая мишень; 10 – узел крепления мишени.

*Рисунок 1. Схема плазменно-пучковой установки имитационного стенда*

Функционирование имитационного стенда обеспечивается следующими системами:

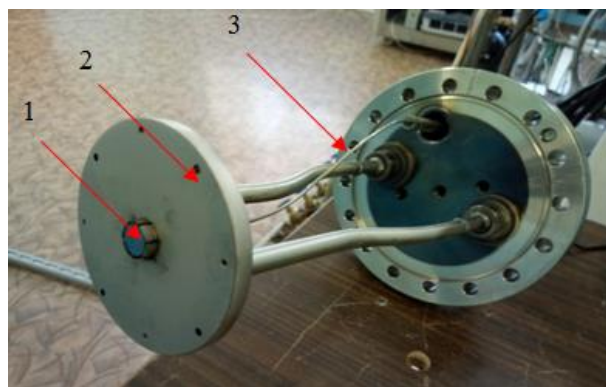
- вакуумной системой (системой откачки) и системой напуска газов в камеру ППР;
- электрической системой (для подачи напряжения к устройствам и механизмам, входящим в состав стенда, таким, как плазмогенератор, электромагнитная система, насосы вакуумной системы и др.);
- системой охлаждения элементов стенда водой;
- системой информационно-измерительной (выполняющая функции представления измерительной информации при контроле параметров технологических систем стенда имитационных испытаний);
- системой диагностики ППР (для определения параметров электронного и плазменно-пучкового разряда).

Принцип работы установки: электронная пушка формирует аксиально-симметричный электронный пучок. Катод пушки подогревается электронной бомбардировкой с нити подогревателя. Электронный пучок взаимодействует с рабочим газом в разрядной камере, образуя плазменный шнур. Плазменный разряд попадает на образец испытываемого ма-

териала, размещенный на мишенном устройстве, расположенном в камере взаимодействия.

## 2. УСЛОВИЯ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОПЕРАЦИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭКСПЕРИМЕНТА

При проведении экспериментов образец вольфрама размерами диаметр 10 мм, толщина 1 мм, устанавливался в мишенное устройство охлаждаемого коллектора. Предварительно было высверлено углубление 0,9 мм для установки термопары типа ХА (хромель-алюмелевая) на обратной стороне образца. Расположение образца в мишенном устройстве изображено на рисунке 3.



1 – образец, 2 – мишенный узел, 3 – термопара типа ХА.

*Рисунок 3. Расположение образца на мишенном устройстве*

Выбор вольфрамового образца был обусловлен его свойствами. Согласно литературным данным о растворимости изотопов водорода в данном материале, следует, что данный материал (наряду с молибденом и рядом других тугоплавких металлов и сплавов) обладает одним из самых низких значений константы растворимости (меньше, чем в нержавеющей стали, на более чем 2 порядка). В связи с этим целесообразно проведение экспериментов по линейному нагреву с применением внедряемой программы именно с вольфрамовым образцом.



1 – камера ЭЛП; 2 – ЭЛП; 3 – электромагнитные катушки; 4 – зонд Ленгмюра; 5 – камера плазменно-пучкового разряда; 6 – камера взаимодействия; 7 – камера загрузки образцов.

*Рисунок 2. Общий вид плазменно-пучковой установки имитационного стенда*

Таблица 1. Режимы линейного нагрева образца электронным пучком

| № режима | Ограничение по напряжению Spellman, В | Ток Spellman, мА | Скорость нагрева, °С/с | Время нагрева, с | Уставка температуры нагрева, °С |
|----------|---------------------------------------|------------------|------------------------|------------------|---------------------------------|
| 1        | 5000                                  | 400              | 1                      | 1000             | 1000                            |
| 2        | 5000                                  | 400              | 5                      | 200              | 1000                            |
| 3        | 5000                                  | 400              | 10                     | 100              | 1000                            |

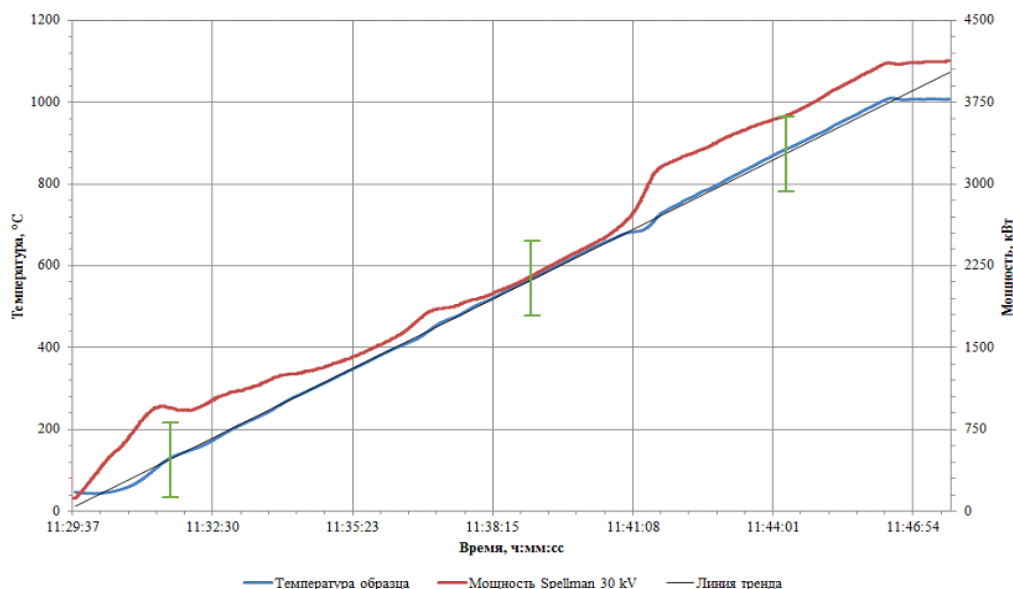


Рисунок 4. График линейного нагрева образца вольфрама со скоростью 1 °С/с.

Перед проведением эксперимента осуществлялось вакуумирование полости камер взаимодействия и электронно-лучевой пушки (ЭЛП) при помощи форвакуумного насоса до давления  $1 \times 10^{-3}$  Торр. Рабочее давление достигалось турбомолекулярными насосами, которое составляло  $2,84 \times 10^{-6}$  Торр и  $5,42 \times 10^{-5}$  Торр соответственно. Произведена подача воды в тракты охлаждения электромагнитной системы, анода пушки, диафрагмы дифференциальной откачки, мишени и трубы ППР. Осуществлена настройка напряжения нити прямого накала катода на 5 В и ток косвенного подогрева катода 300 мА. Для формирования электронного пучка электромагнитным полем, на блоки питания Genesys подавался ток: катушка № 1 – напряжение 5,7 В, ток 400 А; катушки № 2-6 – напряжение 8,27 В, ток 400 А; катушка № 7 – напряжение 5,67 В, ток 400 А. Режимы линейного нагрева образца электронным пучком представлены в таблице 1.

### 3. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

В результате проведения экспериментов по линейному нагреву вольфрамового образца электронным пучком были построены графики зависимости скорости нагрева от времени.

Условно проведение экспериментов можно разделить на 3 этапа. На первом этапе образец подвергся нагреву электронным пучком со скоростью 1 °С/с. Время нагрева образца составляло 1000 секунд. Установлены следующие значения коэффициентов составляющих ПИД-регулятора: 1) Пропорциональная составляющая – 0,00012, 2) Интегральная составляющая – 0,6, 3) Дифференциальная составляющая – 0,00673. Максимальное значение температуры образца достигло отметки 1009 °С. На рисунке 4 можно наблюдать достаточную линейность нагрева.

На втором этапе экспериментов облучение образца в условиях линейного нагрева проводилось со скоростью 5 °С/с (рисунок 5). Время нагрева составляло 200 секунд. Установлены следующие значения коэффициентов составляющих ПИД-регулятора: 1) Пропорциональная составляющая – 0,0002, 2) Интегральная составляющая – 0,8, 3) Дифференциальная составляющая – 0,00754.

Максимальное значение температуры образца составило 1014 °С. Как видно на рисунке 5, согласно построенным планкам погрешности, максимальное отклонение от заданных параметров температуры вошло в диапазон 10 % погрешности.

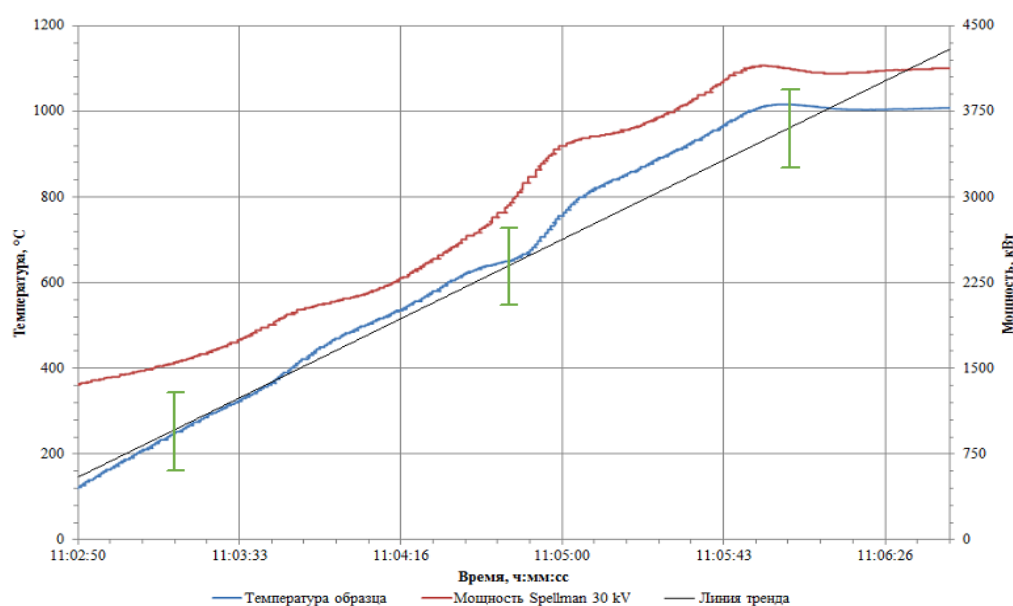


Рисунок 5. График линейного нагрева образца вольфрама со скоростью 5 °C/с

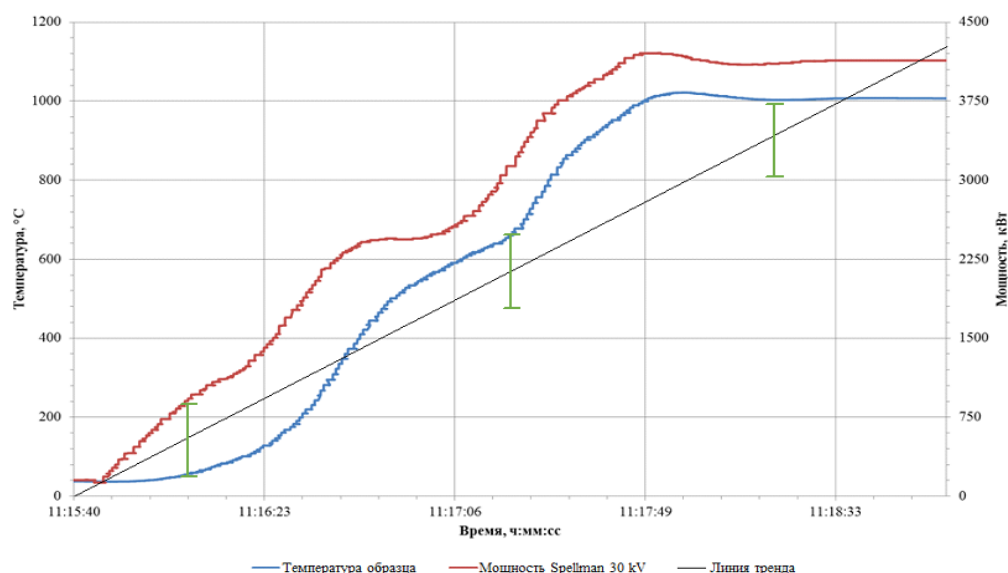


Рисунок 6. График линейного нагрева образца вольфрама со скоростью 10 °C/с.

На третьем этапе экспериментов по оценке возможности применения программируемого нагрева образцов в информационно-измерительной системе имитационного стенда, был осуществлен нагрев образца вольфрама со скоростью 10 °C/с. Время нагрева образца составляло 100 секунд. Зафиксированное максимальное значение температуры образца 1016,8 °C. Установлены следующие значения коэффициентов составляющих ПИД-регулятора: 1) Пропорциональная составляющая – 0,00033, 2) Интегральная составляющая – 0,82, 3) Дифференциальная составляющая – 0,00776. На графике линейного нагрева образца, представленном на рисунке 6, отчетливо видно отклонение температуры.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К основным выводам по проведенным исследованиям следует отнести такие положения:

Подтверждена и продемонстрирована возможность проведения ТДС (термодесорбционного) анализа на имитационном стенде с ППУ без извлечения образцов после насыщения. Определены основные процедуры проведения таких исследований.

Разработан новый способ программированного управления нагревом исследуемых образцов с заданной скоростью с помощью управления блоком питания электронной пушки Spellman.

Проведен ряд экспериментов по осуществлению линейного нагрева образца вольфрама со скоростью 1 °C/с, 5 °C/с и 10 °C/с. Исходя из результатов про-

веденных исследований можно сделать следующие выводы:

- подтверждена возможность применения программы для линейного нагрева образцов в качестве инструмента для проведения ТДС анализа на имитационном стенде с ППУ;
- согласно построенным графикам зависимости нагрева образца со скоростью 1 °C/с и 5 °C/с, наблюдается достаточно линейный нагрев, что удовлетворяет условиям проведения экспериментов ТДС анализа;

– при проведении экспериментов и анализу полученных данных по линейному нагреву образца со скоростью 10 °C/с, наблюдается нарушение линейности нагрева и зафиксировано превышение 10 %-ой допустимой погрешности. Об этом свидетельствуют планки погрешности, нанесенные на график зависимости.

Причиной отклонения от заданных параметров эксперимента являлась настройка значений коэффициентов составляющих ПИД-регулятора, инерционность термопары и аналогового преобразователя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизация технологических процессов / А.Г. Схиртладзе и др. – М.: ТНТ, 2013. – 524 с.
2. R. Fraunfelder, "Permeation of Hydrogen Through Tungsten and Molybdenum" J. Chem. Phys. 48, 3955 (1967).
3. G. Benamati, E. Serra, and C.H. Wu, "Hydrogen and Deuterium Transport and Inventory Parameters through W and W-alloys for Fusion Reactor Applications" J. Nucl. Mater., 283–287, 1033 (2000).
4. A.P. Zakarov, V.M. Sharapov, E.I. Evko, Hydrogen permeability of polycrystalline and monocrystalline molybdenum and tungsten/ Soviet Mater. Sci. 9 (1973) 149–153.
5. Пооперационная программа стенда имитационных испытаний / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК. – Курчатова, 2012. – № 1144 вн./13-240-03 от 12.09.2012. – 4 с.
6. Anderl R.A., Longhurst G.R., Struttman D.A. Permeation of Deuterium, Implanted into V-15Cr-5Ti // Journal of nuclear materials. – 1987. – Vol. 145. – P. 344–347.
7. Kofstad P., Wallace W.E. Vapor pressure studies of the vanadium-hydrogen system and thermodynamics of formation of vanadium – hydrogen solid solutions // J. Am. Chem. soc. – 1959. – Vol. 81. – P. 5019–5022.
8. Eguchi T., Morozumi S. Influence of alloying elements on the solubility of hydrogen in vanadium // J. of the Japan Institute of Metals. – 1974. – Vol. 38, N 11. – P. 1025–1030.
9. Boes N., Zuchner H. Measurements of the solubility of hydrogen in vanadium, niobium and tantalum with a new electrochemical method // Berichte der Bunsen-Gesellschaft. – 1976. – Vol. 80, N 1. – P. 22–27.
10. Lynch J.F., Reilly J.J., Millot F. The absorption of hydrogen by binary vanadium- chromium alloys//J. Phys. Chem. Solids. – 1978. – Vol. 39. – P. 883–890.

#### ПЛАЗМАЛЫҚ-ШОҚ ҚОНДЫРҒЫСЫ БАР ЕЛІКТЕУЛІ СТЕНДТЕ ҮЛГІЛЕРДІ БАҒДАРЛАМАЛЫҚ ҚЫЗДЫРУДЫ ҚОЛДАНУМЕН ТЕРМОДЕСОРБЦИЯЛЫҚ ТАЛДАУ ЖҮРГІЗУ МҮМКІНДІГІН БАҒАЛАУ

А.А. Туркач, Д.А. Гановичев, Т.Р. Туленберген, И.А. Соколов

ҚР ҰАО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатова, Қазақстан

Осы жұмыста плазмалық-шоқ қондырғысы бар еліктеулі стендтің Spellman электрондық шоқтың қуаттандыру блогын басқару көмегімен, тапсырылған жылдамдықта зерттелінетін үлгілердің бағдарламалық сызықтық қыздыру тәсілін әзірлеу ұсынылды. Алынған нәтижелер, қанықтырғаннан кейін үлгілерді алып тастаусыз ПШҚ бар еліктеулі стендте ТДС (термодесорбциялық) талдау жүргізу мүмкіндігін бағалауға мүмкіндік берді.

#### ASSESSMENT OF AN OPPORTUNITY FOR THERMODESORPTION ANALYSIS USING PROGRAMMABLE HEATING OF SAMPLES AT A SIMULATION TEST BENCH WITH PLASMA-BEAM INSTALLATION

A.A. Turkach, D.A. Ganovichev, T.R. Tulenbergenov, I.A. Sokolov

Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The paper presents development of a programmable line heating method of tested samples with a set velocity through power unit control of the Spellman electron gun of the simulation test bench with plasma-beam installation (PBI). The results enabled to assess the opportunity for thermodesorption (TDS) analysis at the simulation test bench with PBI without removing of samples after saturation.

УДК 621.039.5

## ВАЛИДАЦИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВОТК-НОУ РЕАКТОРА ИВГ.1М

Хажидинов А.С., Гановичев Д.А., Акаев А.С., Мартыненко Е.А., Хажидинова А.Р.

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

Объектом исследования является теплофизическая модель водоохлаждаемого технологического канала с топливом низкого обогащения (ВОТК-НОУ) реактора ИВГ.1М и экспериментальные данные с пусков П17-07, П17-08 и П17-09 реактора ИВГ.1М. Для обоснования применимости разработанной модели в нестационарных расчетах теплофизических процессов реакторной установки ИВГ.1М проведена валидация и верификация теплофизической модели ВОТК-НОУ реактора ИВГ.1М. Разработанная теплофизическая модель ВОТК-НОУ может быть использована для анализа аварийных ситуаций, направленных на обоснование безопасности реактора ИВГ.1М с топливом низкого обогащения.

**Ключевые слова:** реактор ИВГ.1М, тепловыделяющая сборка, стационарный тепловой расчет реактора ИВГ.1М, валидация теплофизической модели.

## ВВЕДЕНИЕ

Реактор ИВГ.1М представляет собой исследовательский водо-водяной гетерогенный корпусной ядерный реактор на тепловых нейтронах с легководным замедлителем и теплоносителем и бериллиевым отражателем нейтронов. Эксплуатирующей организацией является филиал «Институт атомной энергии» Республиканского государственного предприятия «Национальный ядерный центр Республики Казахстан» [1].

В рамках работы по конверсии реактора ИВГ.1М на топливо с низким обогащением необходимо выполнить ряд теплофизических расчетов, имитирующих развитие аварийных ситуаций и направленных на обоснование безопасности реактора ИВГ.1М с ВОТК-НОУ. Данная работа посвящена исследованию адекватности разработанной теплофизической модели ВОТК с топливом низкого обогащения.

При выполнении ответственных инженерных расчетов численными методами для обоснования корректности расчетных моделей необходимо применять процедуру верификации и валидации модели. Верификация проводится в области математики, а валидация – в области физики.

За последнее время в Филиале ИАЭ НЯЦ РК проведен ряд реакторных испытаний (П17-07, П17-08 и П17-09) двух экспериментальных технологических каналов ВОТК-НОУ в натурных условиях. Эти испытания являются составляющей частью работ по обоснованию возможности конверсии реактора ИВГ.1М на низкообогащенное топливо, выполняемых в рамках основного контракта между РГП НЯЦ РК и Аргоннской Национальной Лабораторией (АНЛ) США. Экспериментальные данные с пусков использовались для валидации расчетной трехмерной модели ВОТК, построенной в расчетной программе ANSYS FLUENT.

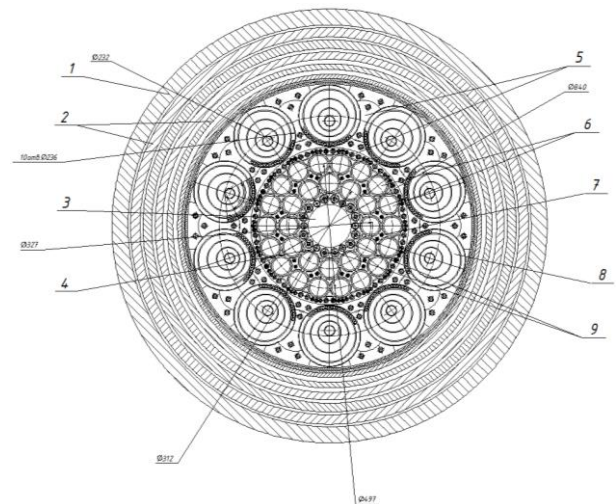
Для верификации результатов расчета, полученных в программе ANSYS FLUENT, использована математическая модель, реализованная посредством расчетной программы MathCAD, которая позволяет

оценить стационарные теплофизические параметры ВОТК-НОУ.

Результаты расчетов, полученных посредством использования рассматриваемой модели, будут включены в отчет «Нормальный режим работы и анализ проектных аварий ИР ИВГ.1М с ВОТК-НОУ».

## 1. КОНСТРУКЦИЯ РЕАКТОРА ИВГ.1М

Активная зона реактора ИВГ.1М содержит 30 ВОТК-НОУ, в которых ТВЭЛы расположены по треугольной решетке, как показано на рисунках 1 и 2 [1, 2]. В центральной ячейке реактора расположен окруженный бериллиевым вытеснителем петлевой канал, в который возможна установка экспериментального устройства.



1 – корпус; 2 – боковые экраны; 3 – петлевой канал; 4 – центральный вытеснитель; 5 – отражатель; 6 – ВОТК; 7 – источник нейтронов; 8 – регулирующие барабаны; 9 – стержни компенсации реактивности.

Рисунок 1. Схема поперечного среза реактора ИВГ.1М

Конструктивные, технические и теплофизические параметры ИВГ.1М позволяют решать следующие задачи: исследование последствий развития аварийных ситуаций в ядерных реакторах в экологи-

ческом аспекте; изучение рабочих процессов, связанные с применением различных типов ТВС и теплоносителей для объектов испытаний; а также задачи радиационного материаловедения в рамках комплексных программ по изучению проблем безопасности АЭС.

На рисунке 3 показан профиль энергосвечения по высоте ТВЭЛа ТВС первого ряда [2–4].

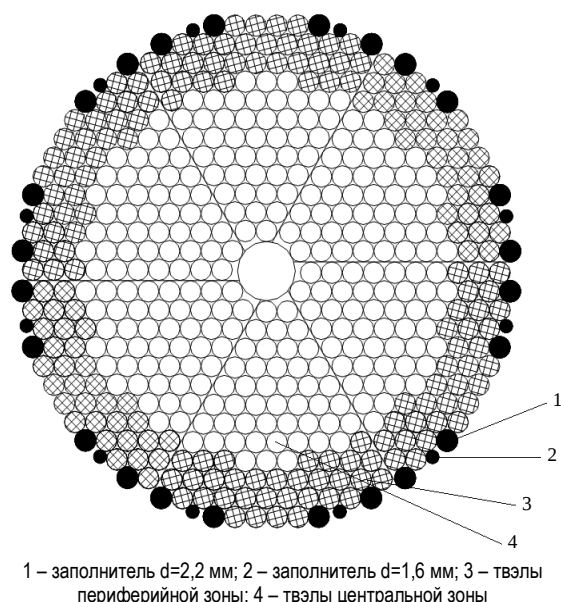


Рисунок 2. Расположение ТВЭЛов в поперечном сечении ТВС, образующих треугольную решетку

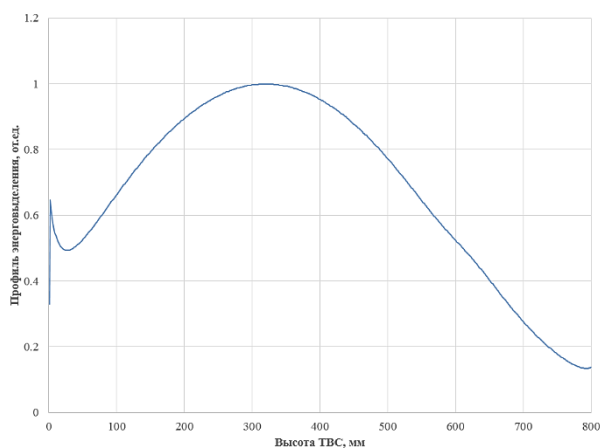


Рисунок 3. Профиль энергосвечения в топливе ТВЭЛа 1 ряда ВОТК при мощности реактора 6 МВт

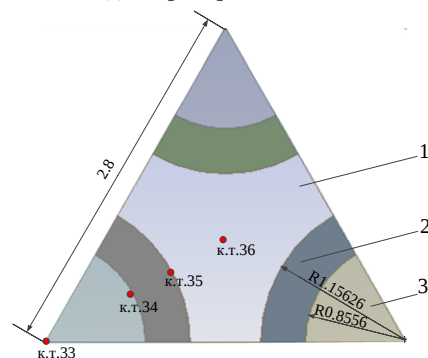
## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ С ПУСКОВ П17-07, П17-08 и П17-09 РЕАКТОРА ИВГ.1М

В таблице 1 указаны экспериментальные значения температуры теплоносителя на входе и выходе из ВОТК-НОУ при заданном расходе и мощности канала во время пусков.

Указанные в таблице значения параметров использовались в качестве исходных данных для расчета значений температуры воды на выходе из ТВС ВОТК-НОУ.

## 3. УСЛОВИЯ РАСЧЕТА И РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ВОТК-НОУ в ПРОГРАММЕ ANSYS FLUENT

Теплофизический расчет проведен в программе FLUENT. Расчетная модель имеет форму треугольной призмы. В расчетной модели ТВЭЛы представлены в виде цилиндра, как показано на рисунке 4. Таким образом, расчетная модель имитирует треугольный сектор решетки ТВС (рисунок 2) высотой 0,8 м. На рисунке 5 приведена конечно-элементная сетка расчетной модели [4–6].



1 – теплоноситель (H<sub>2</sub>O); 2 – оболочка (Э110); 3 – топливо (сплав U-Zr)

Рисунок 4. Расчетная модель ТВС

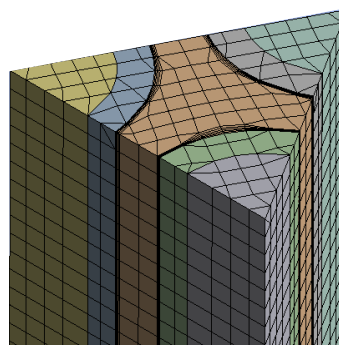


Рисунок 5. Конечно-элементная сетка расчетной модели

Таблица 1. Параметры работы ВОТК-НОУ реактора ИВГ.1М

| Параметр                                                              | Эксперимент П17-09 (11:12) | Эксперимент П17-08 (10:52) | Эксперимент П17-07 (14:00) |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Экспериментальное значение температуры воды на входе в ТВС, °С        | 45,12                      | 42,01                      | 58,9                       |
| Экспериментальное значение температуры воды на выходе из ВОТК-НОУ, °С | 68,7                       | 64,9                       | 80,7                       |
| Расход воды через ВОТК-НОУ, кг/с                                      | 2,24                       | 2,26                       | 2,28                       |
| Мощность одного ВОТК-НОУ, МВт                                         | 0,25186                    | 0,252333                   | 0,25021                    |

В расчетной модели учтены следующие процессы: стационарное распределение энергосвечения по высоте ТВЭЛов, теплообмен за счет теплопроводности, конвективный теплообмен, а также зависимость теплофизических свойств материалов от температуры.

#### 4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОТК-НОУ

Расчет проводится с помощью системы автоматического проектирования и расчета MathCAD 15. Математическая модель создана с помощью системы уравнений, описывающей тепловые процессы в активной зоне [7].

На рисунке 6 показана расчетная схема технологического канала [7].

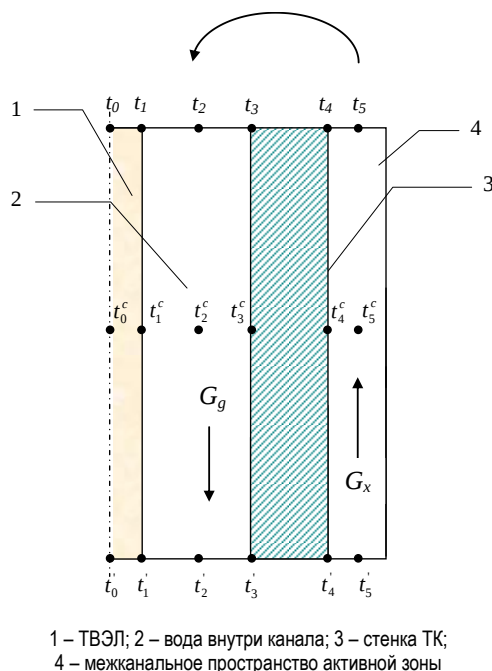


Рисунок 6. Расчетная схема ВОТК-НОУ

На рисунке 6 стрелками показано направление течения воды. Вода, охлаждающая конструкции реактора и внешние поверхности стенок ВОТК-НОУ, из раздаточного коллектора, расположенного в основании реактора, движется вверх. В верхней части каждый технологический канал имеет по 4 щелевых окна, через которые вода поступает в ВОТК-НОУ, охлаждает тепловыделяющую сборку и затем, пройдя по всей длине технологического канала вниз, сливается из реактора.

Для учета неравномерности энергосвечения по высоте активной зоны реактора, модель ТВС разбивается по высоте активной зоны на ряд расчетных участков. Предполагается, что в пределах одного расчетного участка энергосвечение неизменно. На рисунке 6 показан один из расчетных участков. Тепловой баланс рассматриваемого расчетного участка описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} Q_{\text{мec}} = G_g \cdot C_p \cdot (t_2' - t_2) + \alpha_g \cdot F_g \cdot (t_2^c - t_3^c) \\ \frac{G_x \cdot C_p}{30} \cdot (t_5 - t_5') = \alpha_x \cdot F_x \cdot (t_4^c - t_5^c) \\ q_0 \cdot V + \alpha_g \cdot F_g \cdot (t_2^c - t_3^c) = \alpha_x \cdot F_x \cdot (t_4^c - t_5^c) \\ t_3^c - t_4^c = \frac{q_0 \cdot r_1^2}{4 \cdot \lambda_c} \left( \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 2 \cdot \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right) - 1 \right) \end{cases}$$

где:  $Q_{\text{мec}}$  – мощность, выделяемая в пределах расчетного участка ТК, Вт;

$C_p$  – удельная теплоемкость воды при постоянном давлении,  $C_p = 4196$  Дж/(кг·°C);

$\alpha_x$  – коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности корпуса ТК в охлаждающую воду, Вт/(м²·°C);

$\alpha_g$  – коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности корпуса ТК в охлаждающую воду, Вт/(м²·°C);

$r_2$  – наружный радиус корпуса ТК,  $r_2 = 0,038$  м;

$r_1$  – внутренний радиус корпуса ТК,  $r_1 = 0,035$  м;

$V$  – объем стенки ТК расчетного участка, м³;

$F_x, F_g$  – площадь внешней и внутренней поверхностей стенки ТК расчетного участка, м²;

$q_0$  – энергосвечение в стенке ТК, Вт/м³;

$\lambda_c$  – коэффициент теплопроводности стенки ТК,  $\lambda_c = 210$  Вт/(м·°C);

$t_2^c$  – среднее значение температуры воды внутри ТК на расчетном участке, °C;

$t_3^c$  – среднее значение температуры внутренней поверхности стенки ТК, °C;

$t_4^c$  – среднее значение температуры внешней поверхности стенки ТК, °C;

$t_5^c$  – среднее значение температуры воды в межканальном пространстве, °C;

$t_2$  – температура воды в ТК (в начале расчетного участка), °C;

$t_2'$  – температура воды на выходе из ТК (в конце расчетного участка), °C;

$t_5$  – температура воды в межканальном пространстве (в начале расчетного участка), °C;

$t_5'$  – температура воды в межканальном пространстве (в конце расчетного участка), °C.

#### 5. ВАЛИДАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

При выполнении ответственных инженерных расчетов численными методами для обоснования корректности расчетных моделей рекомендуется применять процедуру верификации и валидации модели, разработанную и предложенную ведущими мировыми организациями в области инженерных расчетов – NAFEMS (International Association for the Engineering Modelling, Analysis and Simulation Community) и ASME (American Society of Mechanical Engineers).

Таблица 2. Расчетные значения теплофизических параметров теплоносителя ВОТК-НОУ для серии экспериментов П17-07, П17-08 и П17-09

| Параметр                                                                                                                                                          | Эксперимент П17-09<br>(11:12) | Эксперимент П17-08<br>(10:52) | Эксперимент П17-07<br>(14:00) |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Расчетное значение температуры воды на выходе из ТВС по программе ANSYS FLUENT, °C                                                                                | 72,2                          | 68,9                          | 85,3                          |
| Расчетное значение температуры воды на выходе из ВОТК-НОУ по программе ANSYS, °C                                                                                  | 71,8                          | 68,5                          | 84,8                          |
| Расчетное значение температуры воды на выходе из ТВС по программе MathCAD, °C                                                                                     | 70,6                          | 67,3                          | 83,9                          |
| Экспериментальное значение температуры воды на выходе из ВОТК-НОУ, °C                                                                                             | 68,7                          | 64,9                          | 80,7                          |
| Относительное отклонение расчетных значений температуры воды на выходе из ВОТК-НОУ по программе ANSYS FLUENT от экспериментальных, %                              | 4,5                           | 5,5                           | 5,1                           |
| Относительное отклонение расчетных значений температуры воды на выходе из ТВС по программе ANSYS FLUENT от расчетных значений температуры по программе MathCAD, % | 2,3                           | 2,4                           | 1,7                           |

Исследователь-расчетчик последовательно создает расчетную схему и два вида моделей – математическую и численную. Математическая модель – математическое представление реального объекта или системы. Численная модель – программный код, реализующий представление объекта или системы в форме, приближенной к алгоритмическому описанию, включающей набор данных, характеризующих свойства системы и динамику их изменения со временем.

Применительно к данным видам моделей для проверки их адекватности используются подход верификации и валидации. Верификация проводится в области математики, а валидация – в области физики.

Для оценки результатов расчета использовались данные с пусков П17-07, П17-08 и П17-09 реактора ИВГ.1М в определенный момент времени.

В таблице 2 приведены расчетные значения теплофизических параметров теплоносителя ВОТК-НОУ для серии экспериментов П17-07, П17-08 и П17-09.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы выполнена верификация расчетной теплофизической модели

ВОТК-НОУ, разработанной посредством программного комплекса ANSYS FLUENT, с математической моделью, описывающей стационарное тепловое состояние ВОТК-НОУ, реализованной в системе автоматического проектирования и расчета MathCAD 15. Определено, что отличие результатов, получаемых с помощью разработанного программного кода (численной модели) отличаются от результатов математической модели не более чем на 2,4 %.

Так же выполнена валидация разработанной теплофизической модели ВОТК-НОУ по результатам пусков П17-09, П17-08 и П17-07. Определено, что относительное отклонение расчетных значений температуры воды на выходе из ВОТК-НОУ от экспериментальных не превышает 5,5 %.

Таким образом, разработанная теплофизическая модель применима для оценки теплофизических параметров ВОТК-НОУ реактора ИВГ.1М, также модель может быть использована для анализа аварийных ситуаций, направленных на обоснование безопасности реактора ИВГ.1М с топливом низкого обогащения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Комплекс исследовательских реакторов «Байкал-1». Исследовательский реактор ИВГ.1М: Отчет по анализу безопасности: АК.65000.01.966Д / отделение ИАЭ РГП НЯЦ РК. – Курчатов, 12.11.2013. – Инв. № К-51622.
2. Описание реактора ИВГ.1М: Отчет: / отделение ИАЭ РГП НЯЦ РК. – Курчатов, 10.11.2010. – № 37-370-01/1729 вн.
3. Характеристика активной зоны реактора ИВГ.1М с низкообогащенным ураном: отчет (Deliverable 2.3 under ANL Contract 0J-30461-0002B) / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК. рук. А.А. Колодешников, А.Д. Вурим, В.А. Зувев. – Курчатов, 2011. – 31 с.
4. Расчет энерговыделения реактора ИВГ.1М с ВОТК-НОУ № 11-220-02/69вн от 10.01.2017 г / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК. авт. Иркимбеков Р.А.
5. Чиркин, В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники – М.: АТОМИЗДАТ, 1968. – 484 с.
6. «Расчет теплофизических параметров ВОТК-НОУ реактора ИВГ.1М в стационарном режиме при мощности реактора 10 МВт» № 13-240-02/1413вн от 08 сентября 2017 г. / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК.
7. «Расчет параметров охлаждения ВОТК-НОУ реактора ИВГ.1М» №13-240-02/1538вн от 03 октября 2016 г. / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК.

## ИВГ.1М РЕАКТОРЫНЫҢ ССТК- ТБУ ЖЫЛУ ФИЗИКАЛЫҚ МОДЕЛІН БЕКІТУ

А.С. Хажиidinov, Д.А.Гановичев, А.С. Акаев, Е.А. Мартыненко, А.Р. Хажиidinova

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

Зерттеу объекті ретінде ИВГ.1М реакторының төмен байытылған отыны бар сумен салкындатылатын технологиялық каналының (ССТК-ТБУ) жылу физикалық моделі және ИВГ.1М реакторының П17-07, П17-08 және П17-09 іске қосуларынан эксперименттік мәліметтер болып табылады. Әзірленген моделді ИВГ.1М реакторлық қондырғысында жылу физикалық үрдістерінің стандартты емес есептемелерінде қолдануды негіздеу үшін ИВГ.1М реакторының ССТК-ТБУ жылу физикалық моделін бекіту және анықтау жүргізілді. Әзірленген ССТК-ТБУ жылу физикалық моделі төмен байытылған отынды ИВГ.1М реакторының қауіпсіздігін негіздеуге бағытталған апаттық жағдайларды талдау үшін қолданылуы мүмкін.

**Негізгі сөздері:** *ИВГ.1М реакторы, жылу бөлінгіш жинақ, ИВГ.1М реакторының стационарлық жылу есебі, жылуфизикалық моделді бекіту.*

## VALIDATION OF THE THERMOPHYSICAL MODEL OF IVG.1M REACTOR WCTC-LEU

A.S. Khazhidinov, D.A. Ganovichев, A.A. Akaev, Ye.A. Martynenko, A.R. Khazhidinova

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

The object of the study is a thermophysical model of a water-cooled technological channel with low enrichment fuel (WCTC-LEU) of IVG.1M reactor and experimental data from IVG.1M reactor P17-07, P17-08 and P17-09 start-ups. Validation and verification of WCTC-LEU thermophysical model of IVG.1M reactor was conducted to substantiate the applicability of the developed model in non-stationary calculations of thermal processes of the IVG.1M reactor installation. Developed thermophysical model of WCTC-LEU can be used for the analysis of emergency situations aimed at justifying the safety of the IVG.1M reactor with low enrichment fuel.

**Key words:** *IVG.1M reactor, fuel assembly, stationary thermal calculation of IVG.1M reactor, thermophysical model validation.*

УДК 621.039.51: 621.039.56

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСА РЕАКТИВНОСТИ, НЕОБХОДИМОГО ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПУСКА РЕАКТОРА ИГР

Вурим А.Д., Гайдайчук В.А., Котляр А.Н., Козловский Е.В., Миллер А.А., Олжаев И.Т., Журкин С.А., Цхе В.К.

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

Предложен подход к реализации пусков реактора ИГР, повышающий безопасность реакторных испытаний путем уменьшения количества рабочих органов (стержней регулирования) СУЗ, задействованных в работе. На основе массива экспериментальных данных определены связи между параметрами диаграммы мощности реактора и реактивностью, необходимой для ее реализации. На практике проверена корректность и эффективность предлагаемого подхода.

**Ключевые слова:** безопасность реактора, реактор ИГР, система управления и защиты, стержни компенсации реактивности, реактивность, энерговыделение.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач, решаемых в процессе эксплуатации реактора ИГР – как и любого другого исследовательского реактора, является обеспечение безопасности при проведении внутриреакторных экспериментов.

Анализ показывает, что наибольшей опасностью при проведении пуска реактора характеризуется аварийная ситуация, связанная с несанкционированным извлечением из активной зоны рабочих органов СУЗ – так называемым «самоходом» стержней.

Одним из возможных путей смягчения последствий развития этой аварийной ситуации является минимизация величины положительной реактивности, которая может быть введена в активную зону при самопроизвольном извлечении стержней регулирования, что может быть обеспечено за счет уменьшения количества стержней регулирования, задействованных при реализации заданной диаграммы изменения мощности в каждом конкретном эксперименте.

В данной статье приведены результаты анализа экспериментальных данных, полученных при реализации пусков реактора на разных уровнях мощности и с различным энерговыделением. По результатам анализа определены весовые характеристики стержней регулирования с точки зрения их воздействия на реактивность реактора, дана их количественная оценка, предложен алгоритм определения числа стержней, достаточного для реализации заданной диаграммы мощности реактора.

Для подтверждения работоспособности выбранного подхода впервые реализован пуск реактора ИГР с минимальным количеством задействованных стержней регулирования.

### 1. РЕАКТОР ИГР

Импульсный графитовый реактор (ИГР) относится к исследовательским реакторам на тепловых нейтронах, работающим в режиме программируемых импульсов мощности. По принципу гашения импульса реактор является самогасящимся.

Управление мощностью реактора осуществляется с помощью 16 стержней регулирования, которые

по своему функциональному назначению подразделяются на:

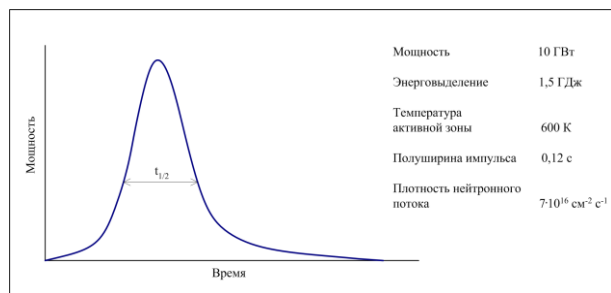
- стержни ручного регулирования (РР, АР, УС1÷УС3);
- стержни компенсирующие (КС1÷КС8);
- стержни пусковые (ПС1÷ПС3).

Конструктивно все стержни регулирования, за исключением УС1...УС3, выполнены одинаково и представляют собой последовательно соединенных на шарнирах графитовых штанг, на которые нанизаны поглощающие кольца. Материал, из которого изготовлены кольца, представляет собой дисперсию гадолиния в графите.

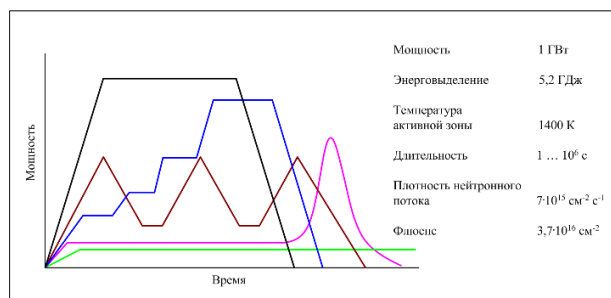
Основными режимами работы реактора являются регулируемый («Импульс») и нерегулируемый режим самогасящейся нейтронной вспышки («Вспышка») (рисунок 1).

Для осуществления режима самогасящейся вспышки реактору сообщается положительная реактивность, ее величина определяет форму, амплитуду и полуширину нейтронного импульса. Гашение вспышки происходит вследствие отрицательного температурного эффекта реактивности. Максимальная мощность реактора, которую можно достичь в этом режиме в соответствии с паспортными характеристиками реактора, составляет 10 ГВт.

Режим «Импульс» (регулируемый режим) осуществляется из подкритического состояния путем сообщения реактору положительного скачка реактивности. При достижении заданного значения мощности срабатывает схема включения в работу автоматического регулятора мощности (АРМ) и далее пуск продолжается в автоматическом режиме. АРМ реализует заданную диаграмму мощности, управляя восемью компенсирующими стержнями. Форма, амплитуда (уровень мощности) и длительность регулируемого режима могут быть самыми различными (рисунок 1) и определяются задачами испытаний исходя из условия не превышения эксплуатационного предела по температуре активной зоны. Максимальное энерговыделение в активной зоне реактора составляет ~5,2 ГДж [1, 2]



а)



б)

Рисунок 1. Основные режимы работы реактора ИГР: нерегулируемый (а) – самогасящаяся «Вспышка» и регулируемый (б) – «Импульс»

## 2. ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Анализ условий безопасного проведения реакторных экспериментов показывает, что наиболее тяжелые последствия может иметь аварийная ситуация, связанная с несанкционированным движением вверх («самоходом») КС СУЗ. Опасность «самохода» заключается в высвобождении избыточной реактивности в активной зоне реактора ИГР и возникновении аварийной ситуации, связанной с перегревом объекта испытаний. Вследствие этого, несмотря на крайне малую вероятность возникновения, «самоход» рассматривается во всех отчетах по обоснованию безопасности реакторных испытаний, как исходное событие аварийной ситуации, ведущей к срыву эксперимента.

Одним из возможных путей решения данной проблемы является сокращение до необходимого минимума количества контролируемых стержней (КС), задействованных для реализации заданной диаграммы изменения мощности. Управление восемью КС осуществляется по восьми идентичным и не зависимым между собой каналам, поэтому для уменьшения числа работающих КС достаточно не включать электропитание приводов незадействованных стержней. С методической точки зрения, для решения данной задачи необходимо определить ключевые параметры, влияющие на изменение реактивности, дать их количественную оценку, а также разработать алгоритм расчета числа стержней, необходимого для реализации заданной диаграммы мощности.

## 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ И ЕЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе анализа результатов пусков, отличающихся видом реализованной диаграммы, величиной мощностью и энерговыделением в активной зоне реактора ИГР, установлено следующее:

- энерговыделение в активной зоне реактора находится в прямой зависимости от перемещения КС;

- уровень мощности реактора также напрямую зависит от скорости движения КС.

На рисунке 2 приведен пример диаграммы изменения мощности пуска реактора ИГР.

Для количественного выражения первой зависимости была обработана серия пусков реактора с энерговыделением в активной зоне от 0,1 до 5 ГДж, второй зависимости – серия пусков с максимальной мощностью реактора от 0,6 МВт до 1 ГВт.

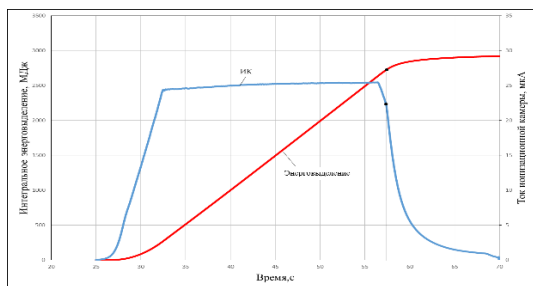
Следует отметить, что в процессе обработки мощность и энерговыделение реактора определялись как величины, пропорциональные току и интегралу тока ионизационных камер, соответственно. В зависимости от мощности и интервала перемещения КС рассчитано интегральное энерговыделение в пусках методом численного интегрирования. Интегрирование тока ионизационных камер выполнялось в интервале рабочего хода КС (рисунок 2). За рабочий ход КС принято перемещение от начала движения до верхней точки, достигнутой КС в процессе пуска. Скорость движения КС получена путем дифференцирования кривых рабочего хода.

В результате исследований были получены зависимости, характеризующие связь между энерговыделением и перемещением восьми КС, а также мощностью реактора и скоростью движения восьми КС. В графическом виде они представлены на рисунке 3.

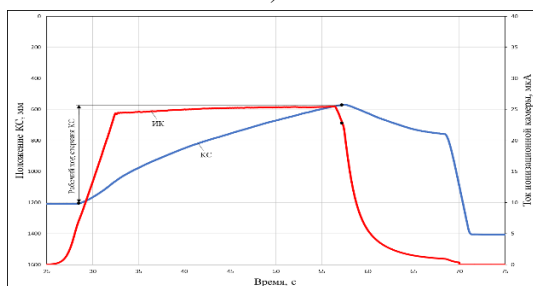
Эти зависимости были преобразованы в гистограммы (см. рисунок 4), которые показывают, какое энерговыделение и мощность можно реализовать с помощью одного, двух и более стержней.

Для определения количества стержней, требуемого для реализации заданной диаграммы достаточно следовать простому алгоритму:

- 1) по первой гистограмме (рисунок 4, а) определить количество стержней, соответствующее заданному энерговыделению;
- 2) по второй гистограмме (рисунок 4, б) определить количество стержней, способное обеспечить поддержание заданного уровня мощности;
- 3) из двух полученных значений выбрать большее.

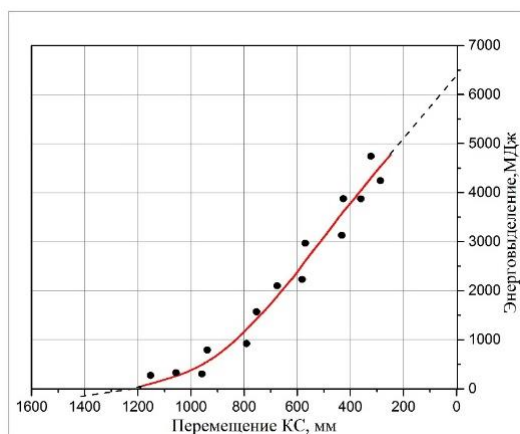


а)

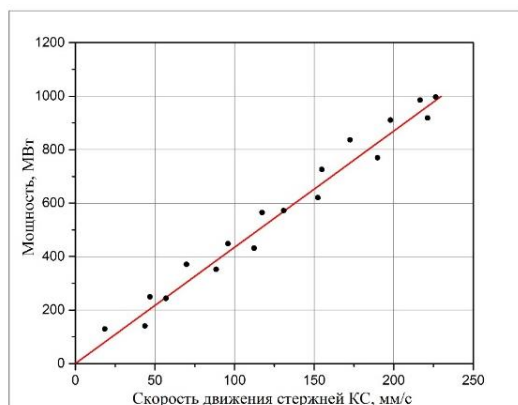


б)

Рисунок 2. Диаграмма изменения мощности пуска реактора ИГР (а) и рабочий ход стержня (б)

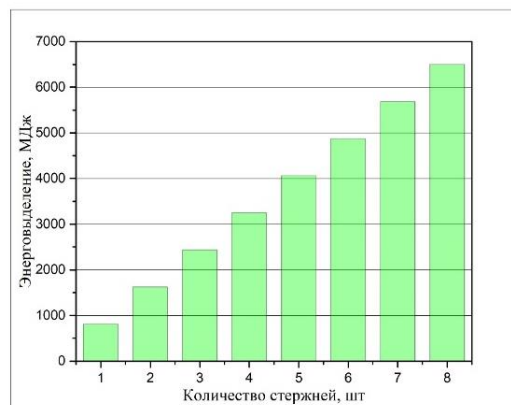


а)

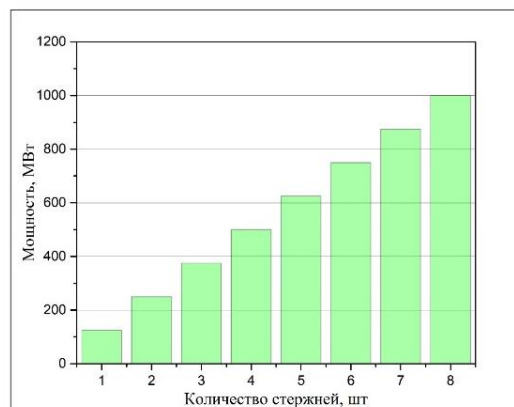


б)

Рисунок 3. а) зависимость энерговыделения от перемещения восьми стержней КС; б) зависимость мощности от скорости движения восьми стержней КС



а)



б)

Рисунок 4. Зависимость энерговыделения (а) и мощности (б) от количества стержней КС

## 5. ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ

Работоспособность предложенного подхода проверена на практике. В рамках одного из экспериментов была предложена диаграмма изменения мощности реактора ИГР (рисунок 5) со следующими параметрами:

- максимальная мощность реактора – 650 кВт;
- энерговыделение в активной зоне реактора – 15 МДж.

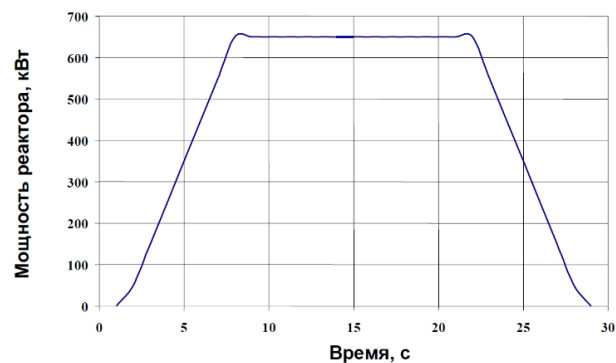


Рисунок 5. Заданная диаграмма изменения мощности реактора ИГР

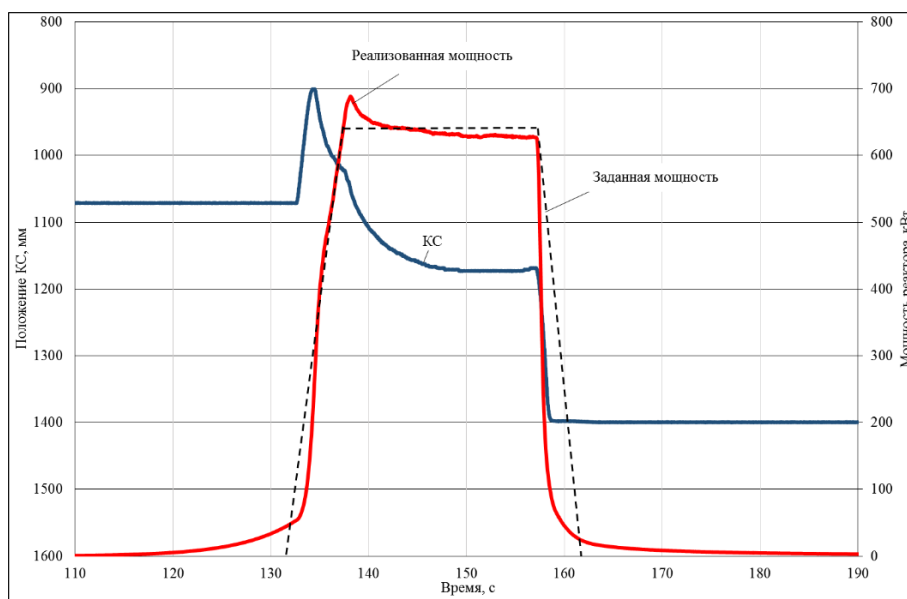


Рисунок 6. Реализованная диаграмма изменения мощности реактора ИГР

Основываясь на заданных параметрах по гистограмме, представленной на рисунке 4а, было определено количество стержней, способных реализовать требуемое энерговыделение (15 МДж).

Затем по гистограмме, представленной на рисунке 4б, определено количество стержней, необходимых для поддержания заданной мощности реактора (650 кВт).

И в первом и во втором случае получилось, что достаточно одного стержня КС.

Полученный результат представлен на рисунке 6.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ массива экспериментальных данных, полученных при реализации пусков реактора на разных уровнях мощности и с различным энерговыделением в активной зоне.

На основе анализа получены зависимости, характеризующие связь между:

- энерговыделением в реакторе и перемещением КС;

- мощностью реактора и скоростью движения КС;

- параметрами заданной диаграммы мощности и необходимым количеством стержней, для ее реализации.

Предложен алгоритм определения количества КС, необходимого для реализации пуска реактора ИГР.

Проверена работоспособность предложенного алгоритма на практике. Впервые реализован пуск реактора ИГР в режиме «Импульс» с минимальным количеством КС. Для однозначного вывода о «работоспособности» предлагаемого подхода необходимо провести серию пусков реактора в диапазоне энерговыделения в АЗ до 5,2 МДж при различных значениях мощности и динамики реактора.

Впервые реализован пуск реактора ИГР в режиме «Импульс» с минимальным количеством КС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование характеристик реактора ИГР после реконструкции. ДСП-24, – Курчатов, 1968 г.
2. Система управления и защиты реактора. Руководство по эксплуатации. АК.65000.01.131 РЭ / ДГП ИАЭ РГП ИЯЦ РК. – Курчатов, 2004.–38с.– Инв. № К-41435.
3. Дж.Р.Кипин. Физические основы кинетики ядерных реакторов. Москва, Атомиздат, 1967 г.
4. Ю.А. Казанский, В.А. Дулин и другие. Методы изучения реакторных характеристик на критических сборках БФС. Москва. Атомиздат, 1977 г.
5. Ю.А. Казанский, Матусевич. Экспериментальные методы в физике реакторов. Москва, Атомиздат, 1978 г.
6. М.И.Кувшинов, П.Ф.Чередник. Методики измерения реактивности, применяемые на быстрых импульсных реакторах. ВАНТ. Серия Импульсные реакторы и простые критические сборки, 1986 г., вып.1, с.16–22.

## ИГР РЕАКТОРЫН ІСКЕ ҚОСУДЫ ЖҮЗЕГЕ АСЫРУ ҮШІН ҚАЖЕТТІ РЕАКТИВТІЛІК ҚОРЫН ЕСЕПТТІ-ЭКСПЕРИМЕНТАЛДЫ АНЫҚТАУ

А.Д. Вурим, В.А. Гайдайчук, А.Н. Котляр, Е.В. Козловский, А.А. Миллер, И.Т. Олжаев, С.А. Журкин, В.К. Цхе

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

Жұмысқа қатыстырылған БҚЖ жұмыс органдарының (реттеу өзектерін) санын азайту жолымен реакторлық сынақтардың қауіпсіздігін арттыратын ИГР реакторының іске қосуын жүзеге асыру жолы ұсынылды. Эксперименттік мәліметтердің массиві негізінде реактор қуаты диаграммаларының параметрлері және оны жүзеге асыру үшін қажетті реактивтілік арасындағы байланыс анықталды. Ұсынылып отырған амалдың дұрыстығы мен тиімділігі іс-жүзінде тексерілді.

**Негізгі сөздер:** реактор қауіпсіздігі, ИГР реакторы, басқару және қорғаныс жүйесі, реактивтіктің орнын толтырушы өзектер, реактивтілік, энергия бөліну.

## CALCULATION AND EXPERIMENTAL DETERMINATION OF REACTIVITY MARGIN REQUIRED FOR IGR REACTOR START-UP

A.D. Vurim, V.A. Gaidaichuk, A.N. Kotlyar, Ye.V. Kozlovskiy, A.A. Miller, I.T. Olzhaev, S.A. Zhurkin, V.K. Tskhe

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

An approach to the implementation of IGR reactor start-up is proposed, which increases the safety of reactor tests by reducing the number of working bodies (control rods) of CPS involved in the work. Based on a set of experimental data, connections between the parameters of the reactor power scheme and the reactivity necessary for its implementation are determined. The correctness and effectiveness of the proposed approach is checked in practice.

**Key words:** reactor safety, IGR reactor, control and protection system, reactivity compensation rods, reactivity, energy release.

УДК: 621.039.533.6

## МОДИФИЦИРОВАНИЕ СВОЙСТВ YSZ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ АРГОНА И КИСЛОРОДА

<sup>1)</sup>Хромушин И.В., <sup>1)</sup>Аксенова Т.И., <sup>2)</sup>Ермолаев Ю.В., <sup>3)</sup>Тусеев Т.Т.

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

<sup>2)</sup>Казахский национальный технический университет, Алматы, Казахстан

<sup>3)</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Изучено влияние облучения высокоэнергетическими ионами кислорода и аргона на структуру и проводящие свойства YSZ разного состава. Показано, что облучение YSZ ионами вызывает незначительные нарушения структуры приповерхностных областей сложного оксида, но не приводит к изменению типа кристаллической решетки. По-видимому, последнее связано с тем, что, как дефекты, так и имплантируемые ионы расположены, в основном, на достаточно больших от поверхности YSZ глубинах. Наряду с этим высокая радиационная стойкость приповерхностных слоев YSZ с концентрацией  $Y_2O_3$  10 и 15 мол. %, по-видимому, обусловлена высокой концентрацией кислородных вакансий в исходных необлученных материалах, которые выступают как эффективные центры рекомбинации для дефектов, образующихся в процессе облучения. В образцах состава  $ZrO_2 + 3$  мол. %  $Y_2O_3$  концентрация вакансий ниже, и в процессе облучения наряду с рекомбинацией имеет место заметный выход кислорода из YSZ. Это приводит к снижению концентрации кислорода и повышению концентрации циркония на поверхности сложного оксида. Определены значения энергий активации кислород-ионной проводимости исследуемых материалов. Замечено, что облучение YSZ тяжелыми ионами в ряде случаев может приводить к улучшению кислород-ионной проводимости данных материалов.

### ВВЕДЕНИЕ

Твердоокисные ионные проводники являются перспективными материалами для использования в качестве рабочего электролита в топливных ячейках, осуществляющих прямое преобразование энергии электрохимического окисления водорода в электрическую энергию [1, 2]. Такие ячейки являются составной частью электрохимических генераторов (ЭХГ) для водородной энергетики, востребованность которой обусловлена экологичностью получения электроэнергии, высоким коэффициентом полезного действия, а также неограниченными запасами водорода на земле.

Основные требования, которым должен удовлетворять материал твердого электролита, – это высокая ионная проводимость, низкая электронная проводимость, химическая стабильность по отношению к диоксиду углерода, механическая прочность, газонепроницаемость. Одним из перспективных твердых электролитов, проявляющих кислород-ионную проводимость и обладающих высокой стабильностью по отношению к диоксиду углерода, считается диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия (YSZ).

При введении в катионную подрешетку  $ZrO_2$  двух ионов  $Y^{3+}$  в кислородной подрешетке создается одна кислородная вакансия. При этом происходит образование комплекса  $Y_{Zr}-V[O]-Y_{Zr}$  – два иона иттрия окружают кислородную вакансию. Такие комплексы ведут к неупругой релаксации при механическом нагружении материала посредством диффузии ионов в энергетически выгодные позиции и к дополнительной устойчивости структуры флюорита. Таким образом, хорошая ионная проводимость, реали-

зуемая путём перескакивания ионов кислорода в несвязанные вакансии, отличает циркониевые керамики от других тугоплавких оксидов.

Несмотря на очевидные достоинства YSZ, проводимость его недостаточно высока. В последние годы активно проводятся исследования возможности контролируемого изменения свойств данного материала путем радиационного модифицирования ионными пучками, что позволило бы повысить его проводимость и улучшить параметры электрохимических устройств на его основе.

Основные результаты, полученные к данному моменту при исследовании влияния облучения на YSZ, связаны с распылением поверхности YSZ тяжелыми ионами низких и средних энергий, а также с процессами формирования металлических нановключений при облучении YSZ ионами металлов [3–5]. Однако мало изучены проводящие свойства радиационно-модифицированного YSZ, хотя именно проводящие свойства обуславливают перспективность применения данного материала. Также недостаточно внимания уделяется тому факту, что исследуемый материал характеризуется высокой подвижностью кислородной компоненты, что создает специфические условия для изменения структурных, оптических и электрических свойств материала при облучении и формирования металлической фазы в приповерхностном слое. Такие исследования особенно актуальны для понимания механизмов радиационного повреждения многокомпонентных материалов и осуществления направленного изменения свойств материала за счет облучения.

Следует отметить другой важный аспект необходимости исследования влияния облучения на YSZ.

Поскольку диоксид циркония является перспективным материалом для использования в качестве инертной матрицы для дожигания младших актинидов и иммобилизации высокоактивных ядерных отходов в ядерных реакторах [6], то научные результаты по влиянию тяжелых ионов на структуру и свойства стабилизированного диоксида циркония могут быть полезны в атомной отрасли.

#### ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Объектом исследования являются образцы диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, трех составов: 1 -  $ZrO_2 + Y_2O_3$  (3 мол. %), 2 -  $ZrO_2 + Y_2O_3$  (10 мол. %) и 3 -  $ZrO_2 + Y_2O_3$  (15 мол. %). Образцы YSZ представляли собой керамические таблетки диаметром 12 и толщиной 1,5 мм. Синтезированные таблетки предварительно шлифовали и отжигали на воздухе при температуре 830 °С в течение 8 часов. Часть отожженных образцов использовали в качестве исходных, остальные образцы облучали ионами аргона и кислорода с энергией 28 и 70 МэВ, соответственно, на ускорителе ДЦ-60, а затем исследовали. Облучению подвергали обе стороны образцов, суммарный флюенс составил  $10^{16} \text{ см}^{-2}$ . Температура в процессе облучения не превышала 100 °С. Расчеты пробегов ионов и повреждаемости YSZ, выполненные с помощью программы SRIM-2013 [7], представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчетов по программе SRIM-2013

| Тип иона        | Энергия, МэВ | Пробег, мкм | Вакансий / Ион |
|-----------------|--------------|-------------|----------------|
| O <sup>+</sup>  | 28           | 10,3        | 2351           |
| Ar <sup>+</sup> | 70           | 10,1        | 10445          |

Как видно из таблицы 1, ионы аргона и кислорода при выбранных энергиях имеют примерно одинаковые пробеги, а повреждаемость ионами аргона значительно выше, чем ионами кислорода. При этом следует отметить, что почти все ионы локализованы в небольшом, по сравнению с проективным пробегом, слое, и образование дефектов в обоих случаях имеет место непосредственно от поверхности образца.

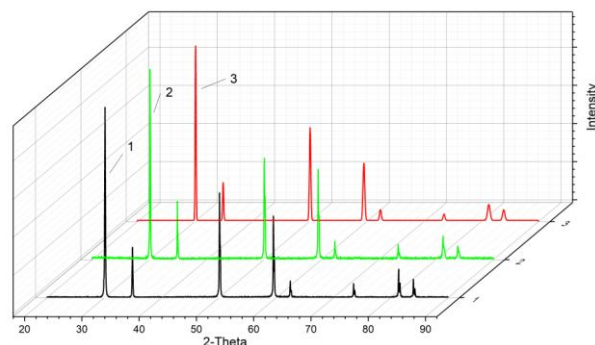
Исследования образцов YSZ выполнены с применением следующих методов и оборудования:

- рентгенофазовый анализ – дифрактометр X'PERT PRO;
- электронно-микроскопическое исследование поверхности – низковакуумный растровый электронный микроскоп JEOL JSM-6490 LA;
- элементный микроанализ поверхности – энергодисперсионный анализатор Oxford Instruments;
- электрохимическая импедансная спектроскопия – потенциостат/гальваностат P-45X + частотный анализатор FRA-24M;
- термодесорбционная спектроскопия – радиочастотный масс-спектрометр MX-7304;

– термогравиметрический и дифференциальный термический анализ – термоанализатор EXSTAR-6300.

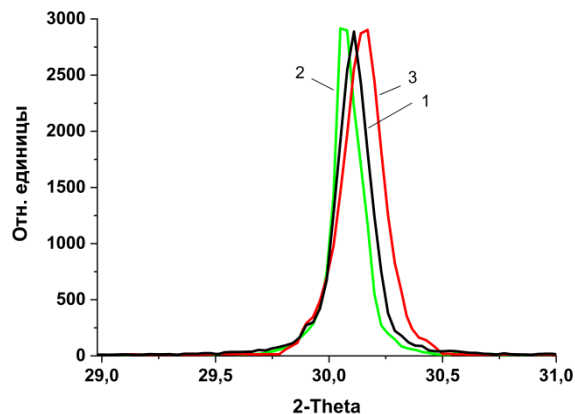
#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рентгенофазовый анализ необлученной керамики YSZ показал, что образцы YSZ состава 1 имели тетрагональную, а образцы составов 2 и 3 кубическую структуру типа флюорита. Облучение образцов YSZ высокоэнергетическими ионами, как кислорода, так и аргона, не приводило к заметной аморфизации сложного оксида. Анализ полученных дифрактограмм показал, что облучение YSZ составов 2 и 3 ионами кислорода вызывало смещение рефлексов в сторону меньших углов, в то время как облучение YSZ ионами аргона, напротив, приводило к смещению рефлексов дифрактограмм в сторону больших углов. В качестве примера на рисунках 1 и 2 представлены дифрактограммы исходных и облученных ионами кислорода и аргона образцов YSZ состава 3 ( $ZrO_2 + Y_2O_3$  15 мол. %) и положение максимума рефлекса [111] для данных образцов, соответственно.



1 – необлученный образец YSZ; 2 – облученный ионами кислорода; 3 – облученный ионами аргона

Рисунок 1. Дифрактограммы образцов состава 3 ( $ZrO_2 + Y_2O_3$  15 мол. %)



1 – необлученный образец YSZ; 2 – облученный ионами кислорода; 3 – облученный ионами аргона

Рисунок 2. Положение максимума рефлекса [111] образца  $ZrO_2 + Y_2O_3$  15 мол. %

Полученные результаты свидетельствуют о том, что облучение YSZ ионами кислорода приводит к увеличению параметра решетки, в то время как облучение ионами аргона приводит к уменьшению параметра решетки сложного оксида. В таблице 2 представлены расчетные значения параметров решетки образцов YSZ составов 2 и 3, облученных ионами кислорода и аргона.

Методом растровой электронной микроскопии изучено состояние поверхности YSZ, облученного ионами кислорода и аргона. На рисунке 3 представлены характерные электронно-микроскопические снимки необлученной и облученной ионами аргона и кислорода поверхности YSZ разного состава, сделанные с увеличением  $\times 1000$ .

Видно, что поверхность образцов с содержанием  $Y_2O_3$  10 и 15 мол. % более рыхлая и пористая, чем поверхность образцов с содержанием  $Y_2O_3$  3 мол. %. Электронно-микроскопические снимки поверхности

YSZ, сделанные при увеличении  $\times 25000$  показали также, что размер зерен на образцах с содержанием  $Y_2O_3$  3 мол. % существенно меньше, чем на образцах с содержанием  $Y_2O_3$  10 и 15 мол. %.

Облучение YSZ высокоэнергетическими ионами кислорода и аргона практически не повлияло на состояние поверхности данного материала. По-видимому, последнее связано с тем, что, согласно выполненным расчетам, как дефекты, так и имплантируемые ионы расположены в основном на достаточно больших от поверхности YSZ глубинах  $\sim 10$  мкм (см. таблицу 1).

Электронно-микроскопические данные хорошо согласуются с результатами по определению плотности и пористости синтезированных образцов. В таблице 3 приведены значения плотности и открытой пористости необлученных образцов YSZ разного состава.

Таблица 2. Параметры решетки необлученных и облученных ионами кислорода и аргона образцов YSZ

| Параметр решетки $ZrO_2+Y_2O_3$ (10 мол. %), Å |                  |                   | Параметр решетки $ZrO_2+Y_2O_3$ (15 мол. %), Å |                  |                   |
|------------------------------------------------|------------------|-------------------|------------------------------------------------|------------------|-------------------|
| исходный                                       | облученный $O^+$ | облученный $Ar^+$ | исходный                                       | облученный $O^+$ | облученный $Ar^+$ |
| 5,128                                          | 5,145            | 5,116             | 5,141                                          | 5,151            | 5,135             |

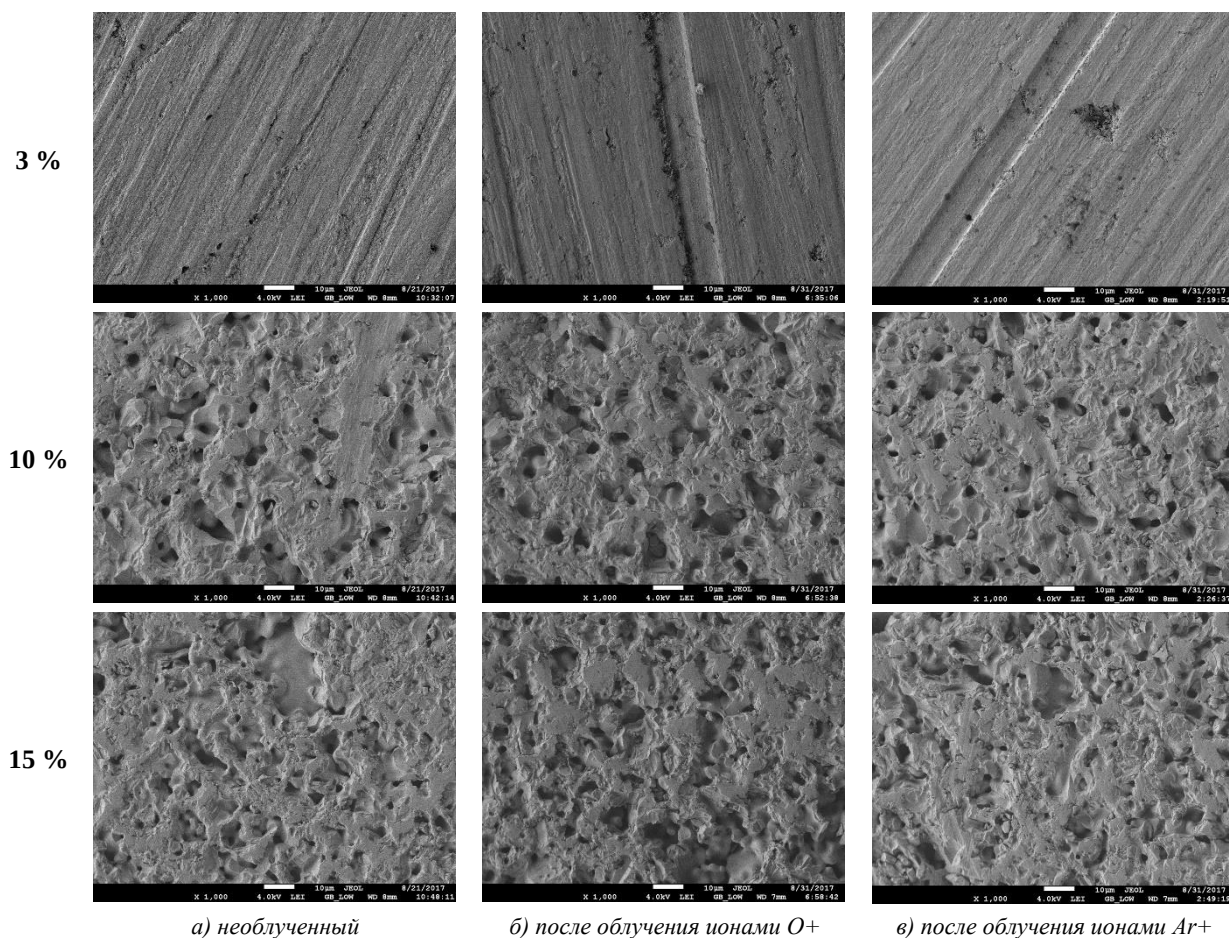


Рисунок 3. Электронно-микроскопические снимки поверхности образцов YSZ разного состава при увеличении  $\times 1000$

Таблица 3. Плотность и пористость образцов YSZ

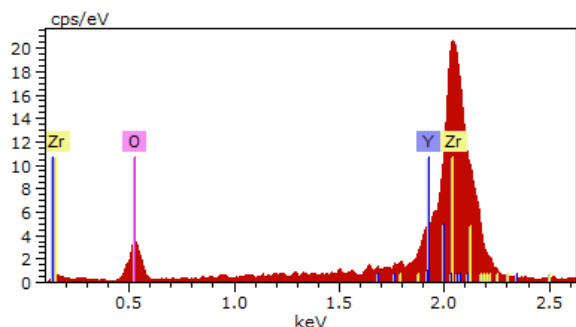
| Образец                                                     | $\rho_{\text{геометр}}, \text{г/см}^3$ | $\rho_{\text{теор}}, \text{г/см}^3$ | Открытая пористость, % |
|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|------------------------|
| ZrO <sub>2</sub> +Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (3 мол. %)  | 5,8                                    | 6,06                                | 0,4                    |
| ZrO <sub>2</sub> +Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (10 мол. %) | 5,4                                    | 5,95                                | 3,7                    |
| ZrO <sub>2</sub> +Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (15 мол. %) | 5,2                                    | 5,84                                | 4,1                    |

Теоретическую плотность YSZ рассчитывали по формуле

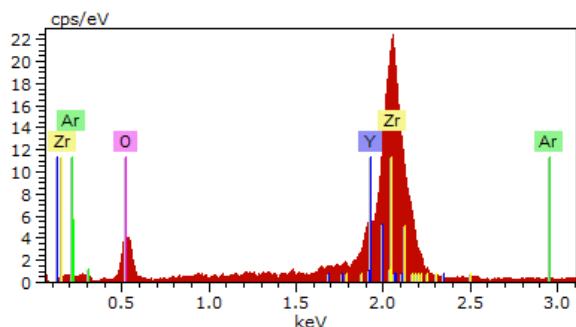
$$\rho_{\text{теор}} = 4 \cdot M / N \cdot V,$$

где  $M$  – молекулярная масса формульной единицы твердого раствора,  $N$  – число Авогадро и  $V$  – объем элементарной ячейки, рассчитанный по данным рентгенофазового анализа. При этом предполагали, что при замещении ионов Zr<sup>4+</sup> ионами Y<sup>3+</sup> в качестве компенсирующих дефектов образуются вакансии кислорода  $\text{Vo}^{\bullet\bullet}$ .

Сквозную (открытую) пористость образцов определяли методом намочения в керосине. Для этого образец взвешивали и ставили в бюкс так, чтобы он только касался керосина. После того, как керосин полностью пропитывал образец, его повторно взвешивали.



а) до облучения ионами Ar<sup>+</sup>



б) после облучения ионами Ar<sup>+</sup>

Рисунок 4. Энергодисперсионный рентгеновский спектр поверхности образца ZrO<sub>2</sub> + Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10 мол. %)

Следует отметить, что для облученных образцов оценить значения плотностей и пористостей образцов не представлялось возможным. Проведены исследования состава поверхности облученных и необлученных образцов YSZ методом энергодисперсионного рентгеновского микроанализа. В качестве примера на рисунке 4 представлены спектры образ-

ца ZrO<sub>2</sub>+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10 мол. %) до и после облучения ионами аргона.

Облучение образцов состава ZrO<sub>2</sub>+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3 мол. %) ионами кислорода и аргона приводило к уменьшению концентрации кислорода и увеличению концентрации циркония на поверхности образцов (таблица 4). По-видимому, это объясняется тем, что в процессе облучения имел место выход кислорода из сложного оксида.

Таблица 4. Элементный состав поверхности образцов ZrO<sub>2</sub> + Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3 мол. %)

| Элемент | Исходный образец | Облученный ионами Ar <sup>+</sup> | Элемент | Исходный образец | Облученный ионами O <sup>+</sup> |
|---------|------------------|-----------------------------------|---------|------------------|----------------------------------|
| O       | 69,353           | 61,023                            | O       | 68,52            | 63,823                           |
| Zr      | 29,297           | 36,91                             | Zr      | 31,48            | 34,157                           |
| Y       | 1,35             | 2,067                             | Y       | 1,573            | 2,02                             |

Облучение ионами аргона и кислорода образцов YSZ с содержанием Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10 и 15 мол. %) не приводило к заметным изменениям стехиометрического состава поверхности YSZ (таблицы 5, 6). Необлученные образцы с таким высоким содержанием допанта характеризуются высокой концентрацией кислородных вакансий, которые, по-видимому, могут выступать в качестве эффективных центров рекомбинации для дефектов, образующихся в процессе облучения. Вероятно, именно благодаря такому активному «отжигу» выхода кислорода и изменения стехиометрии образцов при облучении, практически, не наблюдалось. Таким образом, YSZ с высокой концентрацией Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> должен характеризоваться более высокой радиационной стойкостью.

Таблица 5. Элементный состав поверхности образцов ZrO<sub>2</sub> + Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10 мол. %)

| Элемент | Исходный образец | Облученный ионами Ar <sup>+</sup> | Элемент | Исходный образец | Облученный ионами O <sup>+</sup> |
|---------|------------------|-----------------------------------|---------|------------------|----------------------------------|
| O       | 64,997           | 67,97                             | O       | 67,917           | 66,063                           |
| Zr      | 29,297           | 26,43                             | Zr      | 26,247           | 28,343                           |
| Y       | 5,707            | 5,597                             | Y       | 5,437            | 5,597                            |

Таблица 6. Элементный состав поверхности образцов ZrO<sub>2</sub> + Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (15 мол. %)

| Элемент | Исходный образец | Облученный ионами Ar <sup>+</sup> | Элемент | Исходный образец | Облученный ионами O <sup>+</sup> |
|---------|------------------|-----------------------------------|---------|------------------|----------------------------------|
| O       | 66,133           | 66,31                             | O       | 66,693           | 64,857                           |
| Zr      | 25,257           | 25,513                            | Zr      | 24,737           | 26,59                            |
| Y       | 8,61             | 8,177                             | Y       | 8,573            | 8,56                             |

Образование металлических микровключений путем создания избыточного содержания циркония на поверхности YSZ при облучении ионами аргона и кислорода, по-видимому, имеет место за счет выхода из образца кислорода. При этом данный процесс является доминирующим на образцах с низким содержанием Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3 мол. %) и, соответственно, низкой концентрацией кислородных вакансий в исходном необлученном образце. При образовании кисло-

родных вакансий в процессе облучения YSZ с содержанием  $Y_2O_3$  (3 мол. %) кислород выходит из образца, а не участвует в рекомбинации с кислородными вакансиями, которые в избытке присутствуют в образцах с содержанием  $Y_2O_3$  (10 и 15 мол. %). Таким образом, образование металлических микровключений циркония характерно для образцов состава 1 и не характерно для образцов составов 2 и 3, что и наблюдается в эксперименте. Последнее может оказать положительное влияние на проводящие свойства поверхности сложного оксида, как отмечалось ранее [4, 5].

Проведенные нами исследования процессов термодесорбции из диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, показали, что в диапазоне температур от комнатной до 1000 °C количество  $CO_2$ , которое выделялось из YSZ, было примерно в 20 раз меньше, чем из образцов церата бария [8]. Это согласуется с литературными данными [9–11], согласно которым YSZ характеризуется более высокой химической стабильностью по отношению к диоксиду углерода, чем допированные цераты бария.

Термогравиметрические исследования показали, что относительные потери массы образцами всех исследованных нами составов были незначительны. При этом образцы YSZ, облученные ионами аргона, при нагреве в атмосфере азота до 1150°C теряли примерно в 2 раза больше массы по сравнению с необлученными или облученными ионами кислорода

образцами, а потеря массы составляла около 0,075 % от массы образца.

Поскольку наиболее важным параметром любого электролита является его проводимость, то основное внимание было уделено изучению влияния облучения высокоэнергетическими ионами аргона и кислорода на проводящие свойства YSZ разного состава. Исследования выполнены методом электрохимической импедансной спектроскопии. Измерения импеданса проводили в специально изготовленной твердотельной электрохимической ячейке с использованием потенциостата/гальваностата P-45X с модулем частотного анализатора FRA-24M в диапазоне частот 500 кГц–0,2 Гц в диапазоне температур от комнатной до 800 °C. Образцы YSZ представляли собой таблетки диаметром 12 мм и толщиной ~1,5 мм, на которые были нанесены электроды из пористой платины. Методика измерений импеданса подробно описана ранее в [12].

Импедансные кривые были сняты на необлученных и облученных высокоэнергетическими ионами аргона и кислорода образцах YSZ трех составов ( $ZrO_2+3\%Y_2O_3$ ,  $ZrO_2+10\%Y_2O_3$  и  $ZrO_2+15\%Y_2O_3$ ).

На рисунках 5–7 представлены импедансные спектры, облученных ионами кислорода с энергией 28 МэВ, образцов YSZ разного состава, снятые при указанных на графиках температурах. Для удобства по осям отложены значения действительных и мнимых частей импеданса, соответствующие различным частотам – кривые Найквиста.

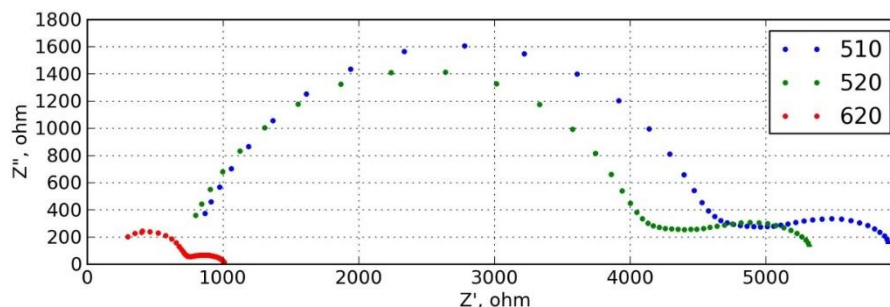


Рисунок 5. Импедансные спектры образца  $ZrO_2+3\%Y_2O_3$ , облученного ионами кислорода

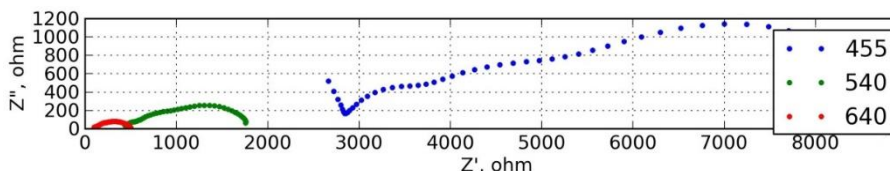


Рисунок 6. Импедансные спектры образца состава  $ZrO_2+10\%Y_2O_3$ , облученного ионами кислорода

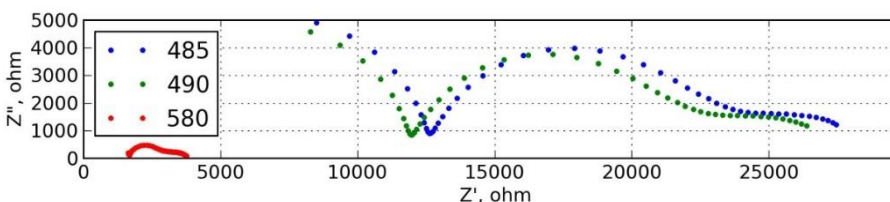


Рисунок 7. Импедансные спектры образца  $ZrO_2+15\%Y_2O_3$ , облученного ионами кислорода

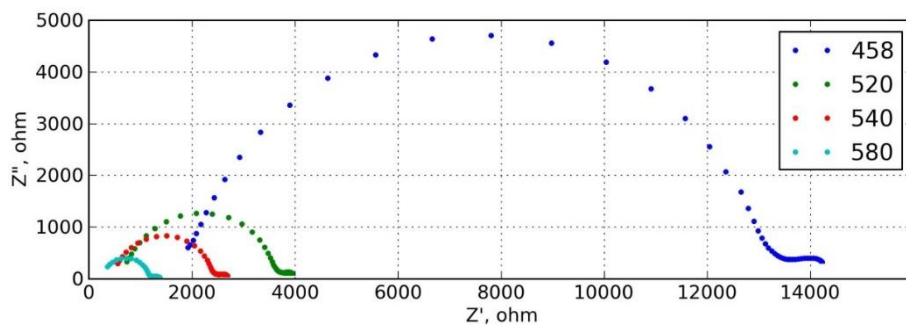


Рисунок 8. Импедансные спектры образца  $ZrO_2+3\%Y_2O_3$ , облученного ионами аргона

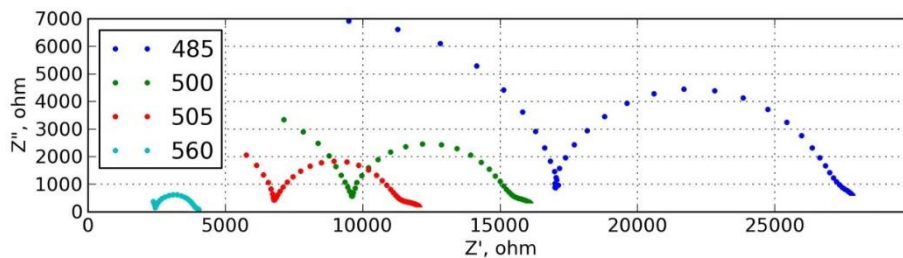


Рисунок 9. Импедансные спектры образца  $ZrO_2+10\%Y_2O_3$ , облученного ионами аргона

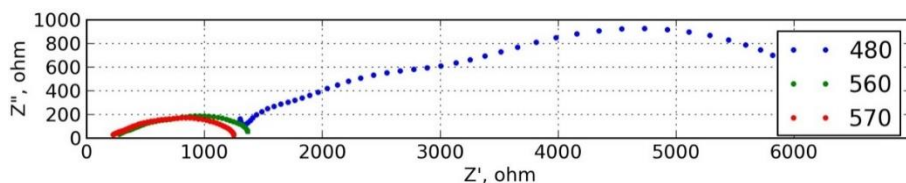
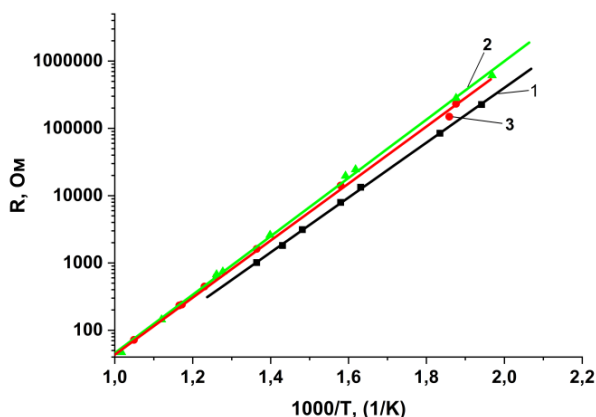


Рисунок 10. Импедансные спектры образца  $ZrO_2+15\%Y_2O_3$ , облученного ионами аргона

На рисунках 8–10 представлены импедансные спектры образцов разного состава после облучения ионами аргона с  $E = 70$  МэВ.

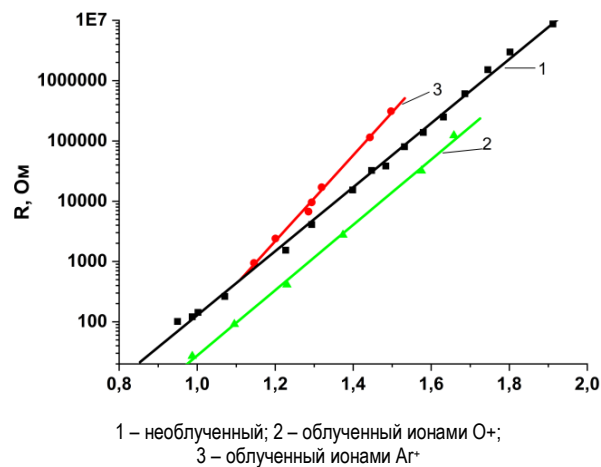
Обработка импедансных спектров была выполнена с помощью программы ZVIEW. Спектры импеданса практически во всех случаях хорошо описывались последовательно соединенными параллельными  $R||CPE$  цепочками.



1 – необлученный; 2 – облученный ионами  $O^+$ ;  
3 – облученный ионами  $Ag^+$

Рисунок 11. Зависимости электросопротивлений «объема» кристаллитов образцов  $ZrO_2+3\%Y_2O_3$  от обратной температуры

На рисунках 11–13 представлены зависимости электросопротивлений «объема» кристаллитов облученных высокоэнергетическими ионами кислорода и аргона образцов YSZ с различным содержанием оксида иттрия от обратной температуры. Сплошными линиями показана аппроксимация экспериментальных данных прямыми, тангенс угла которых характеризует энергию активации кислород-ионной проводимости.



1 – необлученный; 2 – облученный ионами  $O^+$ ;  
3 – облученный ионами  $Ag^+$

Рисунок 12. Зависимости электросопротивлений «объема» кристаллитов образцов  $ZrO_2+10\%Y_2O_3$  от обратной температуры

Как видно из рисунка 11, облучение образцов  $ZrO_2 + 3$  мол. %  $Y_2O_3$ , как ионами кислорода, так и аргона, привело к незначительному ухудшению их проводимости. Причем значения энергий активации кислородной проводимости оставались практически неизменными во всем исследованном диапазоне температур.

Облучение образцов  $ZrO_2 + 10$  мол. %  $Y_2O_3$  ионами аргона привело к увеличению энергии активации кислород-ионной проводимости (рисунок 12), тогда как облучение ионами кислорода практически не повлияло на значение энергии активации. Электро-сопротивление облученного ионами кислорода образца оказалось меньше сопротивления необлученного во всем исследованном диапазоне температур.

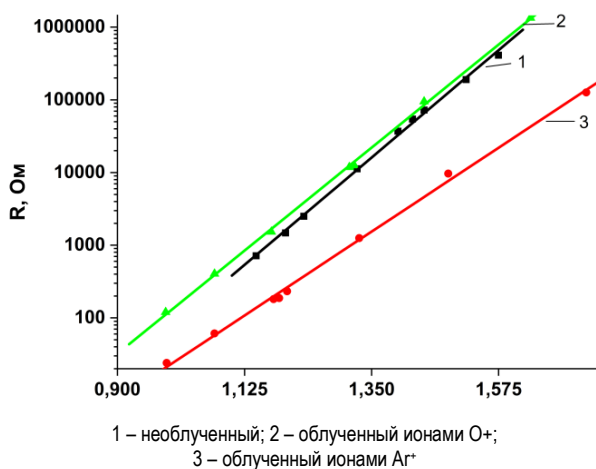


Рисунок 13. Зависимости электросопротивлений тела зерен образцов  $ZrO_2 + 15\%Y_2O_3$  от обратной температуры

Облучение образцов  $ZrO_2 + 15\% Y_2O_3$  ионами аргона привело к существенному уменьшению их электросопротивления (рисунок 13) и снижению энергии активации кислородной проводимости. Следует отметить, что облучение ионами кислорода привело к незначительному росту электросопротивления и снижению значения энергии активации кислородной проводимости «объема» кристаллитов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Iwahara H., Uchida H., Tanaka S. High temperature proton conducting solids oxide fuel cells using various fuels // J. Appl. Electrochem. – 1986.–Vol. 16. – P. 663–668.
2. Pal'guev S.F. High-Temperature Solid State Protonic Electrolytes: A Literature Review. Yekaterinburg, Ural. Department of RAN. – 1998. – 82 p.
3. Bauerle J.E., Hrizo J. Interpretation of the resistivity temperature dependence of high purity  $(ZrO_2)_{0.90}(Y_2O_3)_{0.10}$  // J. Phys.Chem. Solids. – 1969. – Vol.30. – P. 565.
4. Solier J.D., Cachadina I., Dominques-Rodriques A. Ionic conductivity of  $ZrO_2-12$  mol %  $Y_2O_3$  single crystals // Phys. Rev. B. – 1993. – Vol.48. – P. 3704.
5. Горшков О.Н. О формировании нанокластеров циркония в стабилизированном диоксиде циркония при облучении ионами. // Вестник Нижегородского университета им. Лобачевского. 2010. – №5 (2).– С. 271–278.
6. W.L. Gong, W. Lutze, R.C. Ewing. Zirconia ceramics for excess weapons plutonium waste // Journal of Nuclear Materials. – 2000. – V. 277. – Issues 2–3. – P. 239–249.
7. Ziegler J.F., Biersack J.P., Ziegler M.D., SRIM – The Stopping and Range of Ions in Matter. – 2012.– 398 p.

Значения энергий активации кислородной проводимости «объема» кристаллитов облученных и необлученных образцов всех составов приведены в таблице 7.

Таблица 7. Значения энергий активации кислородной проводимости в YSZ

| Состав             | E акт, эВ            |                              |                               |
|--------------------|----------------------|------------------------------|-------------------------------|
|                    | необлученный образец | O <sup>+</sup><br>E = 28 MeV | Ar <sup>+</sup><br>E = 70 MeV |
| $ZrO_2+3\%Y_2O_3$  | 0,81                 | 0,86                         | 0,8408                        |
| $ZrO_2+10\%Y_2O_3$ | 1,053                | 1,075                        | 1,416                         |
| $ZrO_2+15\%Y_2O_3$ | 1,3                  | 1,25                         | 1,018                         |

Следует отметить, что полученные значения энергий активации кислородной проводимости «объема» кристаллитов хорошо согласуется с результатами работы [13].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучено влияние облучения высокоэнергетическими ионами кислорода и аргона на структуру и проводящие свойства YSZ разного состава. Сделан вывод о том, что высокая радиационная стойкость приповерхностных слоев YSZ с концентрацией  $Y_2O_3$  10 и 15 мол. % обусловлена высокой концентрацией кислородных вакансий в исходных, необлученных материалах, которые выступают как эффективные центры рекомбинации для дефектов, образующихся в процессе облучения. Поскольку в образцах  $ZrO_2 + 3$  мол. %  $Y_2O_3$  концентрация вакансий ниже, в процессе облучения наряду с рекомбинацией имеет место заметный выход кислорода из YSZ. Это приводит к снижению концентрации кислорода и повышению концентрации циркония на поверхности сложного оксида. Сделан вывод о том, что YSZ с высокой концентрацией  $Y_2O_3$  должен характеризоваться более высокой радиационной стойкостью. Определены значения энергий активации кислород-ионной проводимости исследуемых материалов. Замечено, что облучение тяжелыми ионами YSZ в ряде случаев может приводить к улучшению проводимости данного материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РК (грант AP05130148).

8. Aksenova T.I., Khromushin I.V., Zhotabaev Zh.R., Bukenov K.D., Berdauletov A.K., Medvedeva Z.V. Thermodesorption study of barium and strontium cerates // *Solid State Ionics*. – 2003. – Vol. 162–163. – P. 31–36.
9. Jacobson A.J. Materials for solid oxide fuel cells // *Chem. Mater.* – 2010. – V. 22. – P. 660–674.
10. Lyskov N.V., Kolchina L.M., Pestrikov P.P., Mazo G.N., Antipov E.V. Electrotransport Properties of SOFC Cathode Materials Based on Lanthanum Cuprate Doped with Praseodymium and Strontium Oxides // *Russian Journal of Electrochemistry*. – 2016. – V. 52. – P. 642–647.
11. Boivin J.C., Mairesse G. Recent material developments in fast ion conductors // *Chem. Mater.* – 1998. – V. 10. – P. 2870–2888.
12. Хромушин И.В., Аксенова Т.И. Влияние низкоэнергетических ионов аргона на проводящие свойства YSZ. // *Вестник НЯЦ РК*. – 2017. – выпуск 1. – С. 55–61.
13. Токий Н.В., Перекрестов Б.И., Савина Д.Л., Даниленко И.А. Концентрационная и температурная зависимости энергии миграции кислорода в стабилизированном иттрием диоксиде циркония // *Физика твердого тела*. – 2001. – Т. 53. – Вып.9. – С. 1732–1736.

### АРГОН МЕН ОТТЕГІНІҢ ЖОҒАРЫ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ИОНДАРЫМЕН YSZ ҚАСИЕТТЕРІН МОДИФИКАЦИЯЛАУ

<sup>1)</sup> И.В. Хромушин, <sup>1)</sup> Т.И. Аксенова, <sup>2)</sup> Ю.В. Ермолаев, <sup>3)</sup> Т.Т. Тусеев

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

<sup>2)</sup> *Қазақ ұлттық техникалық университеті, Алматы, Қазақстан*

<sup>3)</sup> *ал-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан*

Өртүрлі құрамды YSZ құрылымына және өткізгіштік қасиеттеріне оттегі мен аргонның жоғары энергетикалық иондарымен сәулелендірудің ықпалы зерделенді. YSZ иондармен сәулелендіру күрделі оксидтің бетке жақын аймақтары құрылымының сәл бұзылуына әкеліп соқтыратыны көрсетілді, бірақ кристалдық тор түріне өзгермейді. Соңғысы, ақаулардың да, және сол сияқты енгізілген иондардың, негізінен, YSZ бетінен жеткілікті үлкен тереңдікте орналасқанымен байланысты болуы мүмкін. Сонымен қатар 10 және 15 мол. % болатын  $Y_2O_3$  концентрациялы YSZ бетке жақын қабаттарының жоғары радиациялық беріктілігі, сәулелендіру кезінде пайда болған ақаулар үшін рекомбинацияның тиімді орталықтары ретінде әрекет ететін, бастапқы сәулелендірілмеген материалдардағы оттекті бос орындардың жоғары концентрациясына байланысты. Құрамы  $ZrO_2 + 3$  мол. % үлгілерінде бос орындардың  $Y_2O_3$  концентрациясы төмен, және де рекомбинациямен қатар сәулелендіру процесінде YSZ-ден оттегінің шығатыны байқалады. Бұл оттегі концентрациясының төмендеуіне және күрделі оксид бетіндегі цирконий концентрациясының жоғарылауына алып келеді. Зерттелетін материалдардың оттегі-иондық өткізгіштігінің активтену энергияларының мәндері анықталды. Бірнеше жағдайларда YSZ ауыр иондармен сәулелендіру осы материалдардың оттегі-иондық

### MODIFICATION OF YSZ PROPERTIES BY HIGH ENERGY IONS OF ARGON AND OXYGEN

<sup>1)</sup> I.V. Khromushin, <sup>1)</sup> T.I. Aksenova, <sup>2)</sup> Yu.V. Ermolaev, <sup>3)</sup> T.T. Tuseev

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

<sup>2)</sup> *Kazakh National Technical University, Almaty, Kazakhstan*

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

The influence of high-energy oxygen and argon ions irradiation on the structure and conductive properties of YSZ of various composition has been studied. It was shown that irradiation with YSZ ions causes minor failures in the structure of the near-surface regions of complex oxide, but does not cause any change in the type of crystal lattice. Apparently, the latter is due to the fact that both defects and implanted ions are mainly located quite deep from the surface of YSZ. Along with this, high radiation resistance of YSZ near-surface layers with the concentration of  $Y_2O_3$  of 10 and 15 mol. %, is apparently due to the high concentration of oxygen vacancies in the initial unirradiated materials, which act as effective recombination centers for defects formed during irradiation. In the samples of  $ZrO_2 + 3$  mol. %  $Y_2O_3$  composition, the concentration of vacancies is lower, and during irradiation there is a notable yield of oxygen from YSZ along with recombination. This leads to decrease in oxygen concentration and increase in zirconium concentration on the surface of the complex oxide. The values of the activation energies of the oxygen-ionic conductivity of the studied materials have been determined. It was noted that irradiation of YSZ with heavy ions in some cases can cause the improvement in the oxygen-ionic conductivity of these materials.

УДК 550.34.064

## НОВАЯ ИНФРАЗВУКОВАЯ ГРУППА МАКАНЧИ И ЕЕ ВОЗМОЖНОСТИ В РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Дубровин В.И., Смирнов А.А.

*Институт геофизических исследований Министерства энергетики Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан*

Описаны результаты изучения возможностей новой инфразвуковой группы Маканчи в регистрации инфразвуковых сигналов от новых, ранее не изученных источников. Приведены первые результаты совместной обработки данных четырех групп: Актюбинск IS31, Курчатов, российской станции Залесово I46 и новой инфразвуковой группы Маканчи.

### ВВЕДЕНИЕ

Казахстанская сеть станций мониторинга включает в себя сейсмические и инфразвуковые станции, данные которых собираются в режиме реального времени и затем обрабатываются в г. Алматы в Казахском национальном центре данных (КНЦД) (рисунок 1). На рисунке также представлены сейсмические и инфразвуковые группы казахстанской сети, общее количество станций в сети выше за счет трехкомпонентных станций. Кроме того, показаны российские станции I46RU и PS33, данные которых также обрабатываются в КНЦД.

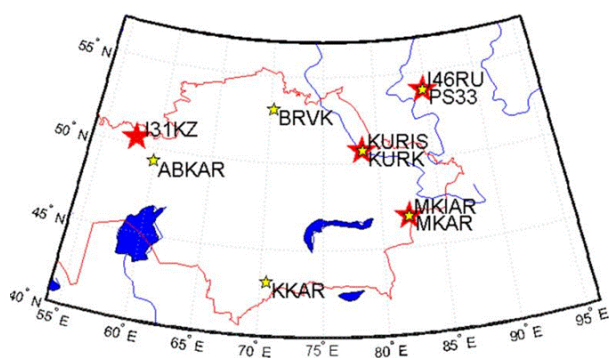


Рисунок 1. Сейсмические и инфразвуковые группы казахстанской сети мониторинга, а также российской сейсмическая группа и инфразвуковая группа Залесово

Институт геофизических исследований (ИГИ) ведет непрерывный инфразвуковой мониторинг. Производится сбор данных с трех инфразвуковых станций - Актюбинск IS31 (станция Международной системы мониторинга), Курчатов (KURIS) и Маканчи (MKIAR), на постоянной основе обрабатываются также данные российской инфразвуковой группы I46RU.

В настоящей работе описаны возможности в регистрации сигналов от различных источников новой инфразвуковой группой Маканчи. Тестирование инфразвуковой группы, показало, что новая станция способна регистрировать в непрерывном режиме и на необходимом качественном уровне акустические сигналы от различных источников.

### ХАРАКТЕРИСТИКА ИНФРАЗВУКОВОЙ ГРУППЫ МАКАНЧИ

С августа 2016 года запущена в эксплуатацию новая инфразвуковая группа Маканчи (MKIAR). Станция входит состав АФТАС (Центр прикладных технологий военно-воздушных сил). Размещена группа в Урджарском районе Восточно-Казахстанской области в 25 км к востоку от поселка Маканчи (рисунок 1).

Инфразвуковая группа размещена в пределах существующей сейсмической группы Маканчи (MKAR, PS23). Группа состоит из 9 элементов (рисунок 2). Конфигурация инфразвуковой системы представляет собой центральный элемент, окруженный малым кольцом из трех элементов, имеющим диаметр около 100 м, и большим кольцом из пяти элементов, имеющим диаметр около 1 км.

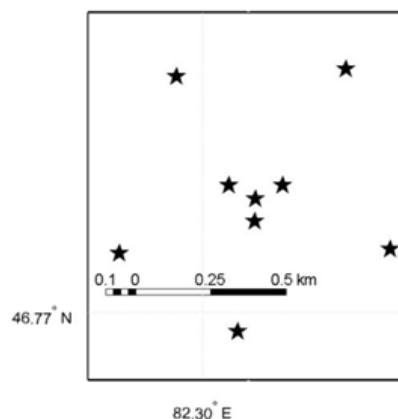


Рисунок 2. Конфигурация инфразвуковой группы Маканчи

В непрерывном режиме станция ведет регистрацию инфразвуковых колебаний. Данные по спутниковому каналу в режиме реального времени передаются в КНЦД (г. Алматы) и в национальный центр данных США (авиабаза Патрик, Флорида, США), где они систематически обрабатываются и анализируются.

### МЕТОДИКА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ

Детектирование сигналов в записях станции производится с использованием детектора РМСС. РМСС – это прогрессивная многоканальная корреляция [1]. Главное достоинство метода заключается

в его способности выделять посредством поиска взаимной корреляции между записями разных элементов инфразвуковой или сейсмической группы сигналы, регистрируемые не одним, а несколькими ее элементами. Кроме того, используя этот метод мы можем находить сигналы от постоянно действующих источников. Все данные, регистрируемые станцией изо дня в день, обрабатываются и заносятся в автоматический бюллетень детектирований. Сформированный в результате расчетов бюллетень представляет собой набор строк, расположенных в хронологическом порядке, каждая из которых включает информацию о параметрах (время, азимут, скорость, частота, амплитуда).

Анализ накопленного материала позволяет составить представление об источниках инфразвука, сигналы которых регистрирует станция. На рисунке 3 представлен бюллетень детектирований для станции МКИАР за период с августа 2016 г. по ноябрь 2017 г.

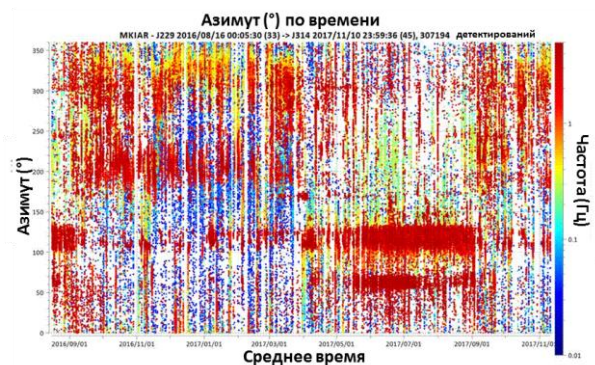


Рисунок 3. Бюллетень детектирований для станции Маканци за период с августа 2016 г. по ноябрь 2017 г.

Как видно из рисунка 3, станция МКИАР детектирует множество сигналов. Можно выделить несколько преобладающих азимутов прихода. На рисунке 4 представлено распределение количества сигналов по частотам.

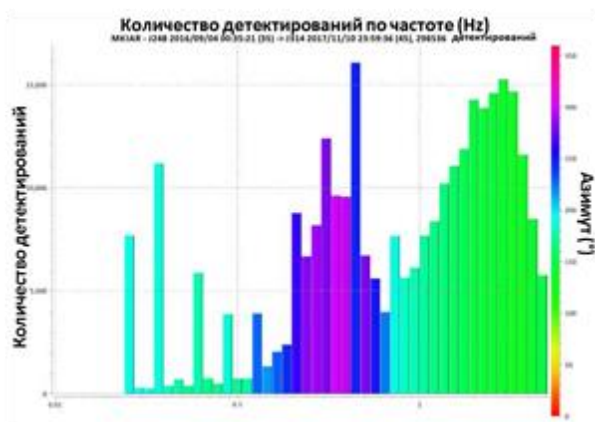


Рисунок 4. Гистограмма частотного распределения сигналов, зарегистрированных станцией Маканци за период с августа 2016 г. по ноябрь 2017 г.

Как видно из рисунка 4, все приходящие сигналы можно условно распределить на три группы: сигналы в первой группе имеют частоты в полосе 0,02–0,12 Гц, во второй 0,12–0,68 Гц и в третьей 0,68–5,0 Гц. Гистограммы распределения сигналов по азимутам прихода в каждой из этих групп изображены на рисунке 5.



а) для частотных интервалов 0,02–0,12 Гц.



б) для частотных интервалов 0,12–0,68 Гц.



в) для частотных интервалов 0,68–5,0 Гц.

Рисунок 5. Распределение сигналов по азимутам прихода

Сигналы, имеющие частоту 0,02–0,12 Гц, не имеют какого-то преобладающего азимута прихода. Такие сигналы встречаются в практике инфразвуковых наблюдений КНЦД впервые и их природа пока неизвестна и, несомненно, будут изучаться в будущем. Сигналы, имеющие частоту 0,12–0,68 Гц, напротив, имеют четко преобладающий азимут прихода, пода-

вляющее их большинство приходит с северо-запада. Нет никаких сомнений, что это микробаромы, генерирующиеся в северной Атлантике [2]. Самые высокочастотные сигналы, имеющих частоту 0,68–5,0 Гц, приходят из целого ряда преобладающих направлений. На рисунке 6 гистограмма распределения азимутов прихода высокочастотной группы вынесена на космический снимок Google Earth. Самое большое количество сигналов в этой группе приходит с юго-востока. Природа этих сигналов пока неизвестна. Наиболее вероятная гипотеза их происхождения – какая-то индустриальная активность в КНР. Самое большое количество сигналов имеет азимут прихода около 110° и 130°. В направлении 120° находится город Карамай, возможно сигналы генерируются при сжигании попутного газа на месторождениях вблизи этого города. На гистограмме распределения сигналов по азимутам прихода имеется как минимум три меньших четко выраженных пика. Анализ космического снимка показывает, что каждому из этих пиков соответствует относительно недалеко расположенная горная система с мощными ледниками. Например, пик с азимутом 200° соответствует массиву горы Женгиш Чокосу, старое название пик Победы. Это высочайшая вершина Тянь-Шаня, вблизи нее расположен шестой в мире по длине из неполярных ледников – Южный Иньльчек. Таким образом, с большой степенью уверенности можно сказать, что сигналы, соответствующие этим трем пикам – это инфразвуковые сигналы от ледовых землетрясений на высокогорных ледниках. Сейсмические сигналы от этих источников уверенно регистрируются сейсмической группой MKAR, установленной в том же месте, что и инфразвуковая группа MKIAR [3].

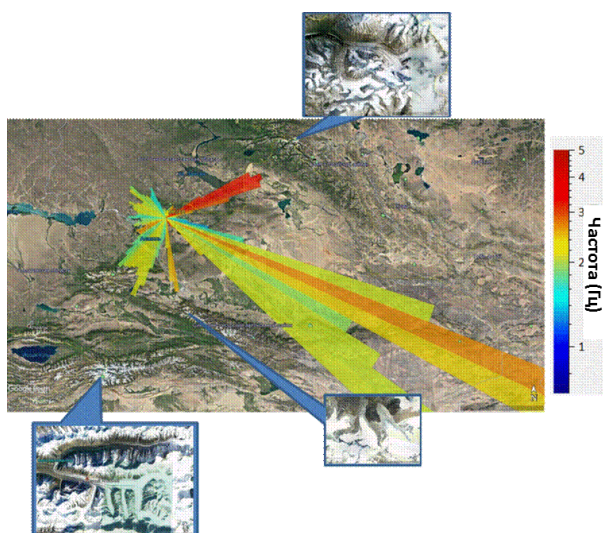


Рисунок 6. Гистограмма распределения сигналов по азимутам прихода на космическом снимке. Частота сигналов 0,68–5,0 Гц

### МЕТОДИКА ЛОКАЛИЗАЦИИ СОБЫТИЙ

Локализация инфразвуковых событий производится с использованием ПМО «Locinfra» [1]. Этот пакет программ был передан в КНЦД комиссариатом атомной энергии Франции в конце 2013 г. ПМО было адаптировано на основе пакета Netinfra, используемого для локализации инфразвуковых событий во французском НЦД. Методология обработки данных сети инфразвуковых станций описана в [2]. Бюллетени, полученные с использованием детектора РМСС, сначала очищаются от детектирований местных сигналов, постоянно действующих и не представляющих интереса источников. Затем производится расчёт всех физически возможных эпицентров. Производится разрешение конфликтных ситуаций, т. к. одному детектированию может соответствовать более одного возможного эпицентра. Разрешение конфликтов производится путем расчёта рейтинга для каждого предварительно полученного решения.

Количество детектирований, сделанных каждой из инфразвуковых станций казахстанской сети мониторинга и российской группой I46RU за период с августа 2016 г. по ноябрь 2017 г. (рисунок 7), показывает, что MKIAR практически не уступает IS31 и значительно превосходит по количеству зарегистрированных сигналов станции IS46 и KURIS, имеющие меньшее количество элементов.

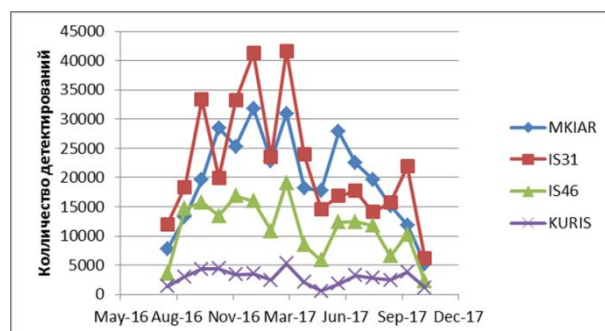


Рисунок 7. Количество детектирований, сделанных каждой из инфразвуковых станций казахстанской сети мониторинга и российской группой Залесово за период с августа 2016 г. по ноябрь 2017 г.

Поэтому очевидно, что использование записей этой станции для локализации событий значительно увеличило общее количество локализованных событий (рисунок 8).

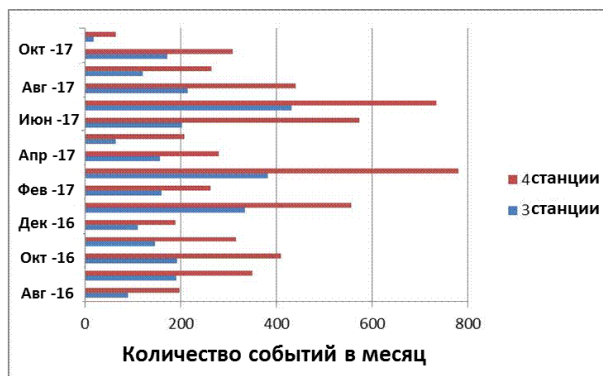


Рисунок 8. Количество событий, регистрируемых ежемесячно сетью ■ из трех станций (Актюбинск, Залесово и Курчатова), и сетью ■ из четырех станций (Актюбинск, Залесово, Курчатова и Маканчи)

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Открытие новой инфразвуковой станции Маканчи на востоке Казахстана позволило повысить количество обнаруживаемых сигналов, начать изучение новых источников инфразвуковых сигналов, которые ранее не были известны. Включение станции Маканчи в систему локализации событий позволило более чем в два раза увеличить общее количество локализуемых по казахстанским станциям инфразвуковых событий.

В целом, ввод в эксплуатацию новой инфразвуковой группы сделал систему мониторинга Казахстана уникальной в мире по плотности сейсмических и инфразвуковых групп, что позволяет повысить надежность и достоверность всей Международной системы контроля за ядерными испытаниями в поддержку ДВЗЯИ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Le Pichon, A. Analyzing the detection capability of infrasound arrays in Central Europe / A. Le Pichon, J. Vergoz, P. Herry, L. Ceranna // Journal of Geophysical Research. 2008. Vol. 113. D12115, doi:10.1029/2007JD009509.
2. Смирнов, А.А. Объяснение природы источников когерентных низкочастотных сигналов, регистрируемых мониторинговой сетью НЯЦ РК / А.А. Смирнов, В.И. Дубровин / Вестник НЯЦ РК. – 2010. – Вып. 3. – С. 76–81.
3. Михайлова, Н. Н. Ледниковые землетрясения Центрального Тянь-Шаня / Н.Н Михайлова, И.И. Комаров / Вестник НЯЦ РК. – 2009. – Вып. 3. – С. 120–126.

### ЖАҢА МАҚАНШЫ ИНФРАДЫБЫСТЫҚ ТОБЫ ЖӘНЕ ӘР КӨЗДЕРІНЕН СИГНАЛДАРДЫ ТІРКЕУІНДЕ ОНЫҢ МҮМКІНШІЛІКТЕРІ

В.И. Дубровин, А.А. Смирнов

*Қазақстан Республикасы Энергетика министрлігінің Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатова, Қазақстан*

Жаңа, бұрын зерделенбеген көздерінен инфрадыбыстық сигналдарды тіркеуде жаңа Мақаншы инфрадыбыстық тобының мүмкіншіліктерін зерделеу нәтижелері сипатталған. Төрт топтың: Ақтөбе IS31, курчатова, Залесово 146 ресей станциясы және жаңа Мақанлы инфрадыбыстық тобы дерктерін бірлескен өңдеудің бірінші нәтижелері келтірілген.

### NEW INFRASOUND ARRAY MAKANCHI AND ITS CAPACITIES IN RECORDING THE SIGNALS FROM VARIOUS SOURCES

V.I. Dubrovin, A.A. Smirnov

*Institute of Geophysical Research of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan*

The paper describes the results of studying the capacities of the new infrasound array Makanchi in recording infrasound signals from new sources that have not been studied earlier. The first results are presented for a cooperative data processing from the four arrays: Aktyubinsk IS31, Kurchatov, Russian station Zalesovo I46 and new infrasound array Makanchi.

УДК 550. 8.621. 039.9(24)

## ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА ПРИ ОЦЕНКЕ ДИНАМИКИ ОБВОДНЕНИЯ ГРУНТОВ В МЕСТАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ (НА ПРИМЕРЕ ВВР-К ИЯФ)

Шульга М.В., Жолдыбаев А.К., Кушербаева Н.Н.

*Институт геофизических исследований Министерства энергетики Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан*

Приведены результаты аналитического и экспериментального изучения геоэлектрических и деформационных свойств песчано-глинистых грунтов с применением электроразведки методом вызванной поляризации, улучшенной за счет исключения влияния электрического сопротивления грунтов, на примере района расположения реактора ВВР-К, ИЯФ. Полученные данные могут быть использованы при инженерно-геологическом мониторинге безопасности потенциально опасных объектов в подобных геологических условиях.

### ВВЕДЕНИЕ

Неотъемлемой составляющей обеспечения безопасности эксплуатации объектов атомной отрасли является мониторинг инженерно-геологических условий их размещения [1], в частности – наблюдения деформационных свойств грунтов в основании производственных зданий. Как показала практика [2, 3], наибольшие изменения этих свойств, особенно в глинистых грунтах, происходят при их обводнении и изменении режима этого процесса во времени.

Для изучения изменения и прогнозирования обводненности грунтов кроме традиционных инженерно-геологических технологий привлекаются и геофизические методы, в том числе и электроразведка методом сопротивлений [4]. При этом решаются задачи по расчленению пород по составу, дисперсности и влажности в параметрах кажущегося электрического сопротивления ( $\rho_k$ ) и поляризуемости ( $\eta_k$ ). Физической основой решения этих задач, как показано в [5], является снижение электрического сопротивления и повышение поляризуемости в обводнённых песчано-глинистых грунтах.

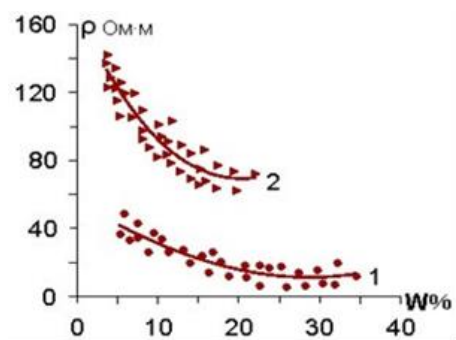
Целевым назначением работы ставилась оценка информационных возможностей электроразведки в параметрах электрического сопротивления и поляризуемости для выявления и мониторинга изменений обводненности грунтов в местах расположения объектов атомной отрасли. В состав работ для выполнения целевого задания входили информационно-аналитические исследования по обоснованию способов решения поставленной задачи и их апробация полевыми съёмками на территории, прилегающей к реактору ВВР-К. Результаты этих работ являются предметом рассмотрения в настоящем докладе.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

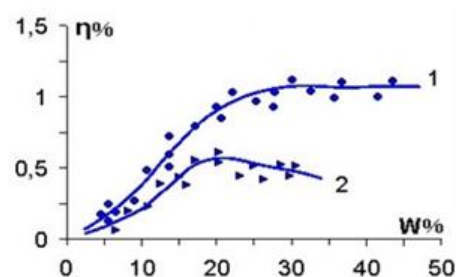
Информационную основу для изучения возможности повышения достоверности данных электроразведки при изучении обводненности и особенностей строения песчано-глинистых разрезов составили результаты анализа их геоэлектрических и деформационных свойств, прочностных свойств, а также данные полевых электроразведочных съёмок.

### Результаты анализа геоэлектрических свойств песчано-глинистых грунтов

Зависимости электрического сопротивления и поляризуемости различных типов песчано-глинистых грунтов от влажности детально изучены в работе [6]. На основе данных измерений по пробам, взятым из шурфов, показано наличие однозначного снижения электрического сопротивления (рисунок 1, а) по мере повышения влажности образцов грунтов.



а) удельное электрическое сопротивление суглинков (1) и песков (2)



б) поляризуемость суглинков (1) и песков (2)

Рисунок 1. Зависимость геоэлектрических свойств песчано-глинистых грунтов от относительной влажности по литературным данным [6]

При этом максимальные градиенты понижения электрического сопротивления ( $\sim 40\text{--}70 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) вполне закономерно получены в песках, электропроводность которых, главным образом, определяется объемом воды в поровом пространстве. Тогда как в суглинках, изначально имеющих повышенную ионную

проводимость, снижение электрического сопротивления за счёт обводненности проявлено в меньшей степени ( $\sim 40\text{--}15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ), чем в песках.

Несколько иное изменение поляризуемости установлено при повышении влажности этих грунтов (рисунок 1, б). В интервале изменения влажности от 2 до 15 % различия в этом параметре в суглинках и песках практически нет. При изменении влажности от 15 до 20 %, поляризуемость этих грунтов возрастает практически с прежними градиентами. Далее, по мере увеличения влажности до 35 % и более, для суглинков имеет место резкое снижение приращения поляризуемости, тогда как в песках значения этого параметра имеют тенденцию к снижению.

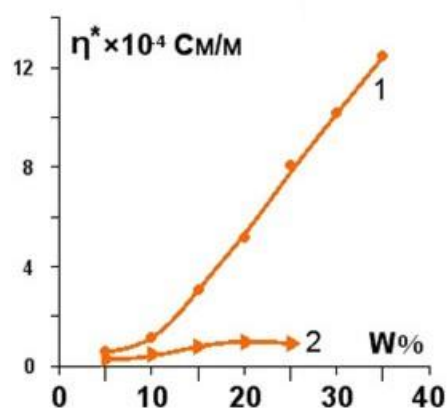
Однако, экспериментально установлено [6, 7], что гораздо в большей степени электрическое сопротивление и поляризуемость грунтов зависят от минерализации воды. В этой ситуации, очевидно, что данные электроразведки по расчленению разреза и оценке его обводненности будут носить лишь вероятностный характер, пока не будет методических инструментов для исключения влияния минерализации воды.

И если учёт влияния минерализации в электрическом сопротивлении практически невозможен, то в поляризуемости решение этой задачи может быть получено на основе привлечения параметра относительной поляризуемости  $\eta^*$ . В работе [7] показано, что для зернистых ионопроводящих пород справедливо соотношение  $\eta^* \approx \eta/\rho$ , где:  $\eta$  – поляризуемость,  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление.

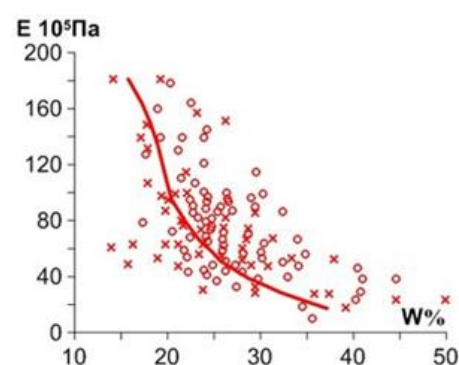
Для проверки этого положения выполнены расчёты относительной поляризуемости для суглинков и песков по данным, приведённым на рисунке 1. Результаты этих расчётов (рисунок 2, а) свидетельствуют, о том, что в параметре относительной поляризуемости суглинки и пески устойчиво различаются при значениях влажности более 10% (естественная влажность).

При этом дальнейшее увеличение влажности отражается практически линейным нарастанием относительной поляризуемости суглинков, тогда как для песков значения этого параметра изменяются несущественно.

На рисунке 2, б приведены данные [8], свидетельствующие о закономерном снижении значений модуля деформации глинистых грунтов по мере увеличения их влажности. При установлении корреляционной связи между этим параметром и поляризуемостью в зависимости от влажности, очевидна принципиальная возможность привлечения последнего не только для оценки динамики обводненности глинистых грунтов, но и для их упруго-деформационных свойств.



а) относительная поляризуемость суглинков (1) и песков (2)



б) модуль деформации глинистых и пылеватых грунтов

Рисунок 2. Зависимость относительной поляризуемости и модуля деформации песчано-глинистых грунтов от относительной влажности [8]

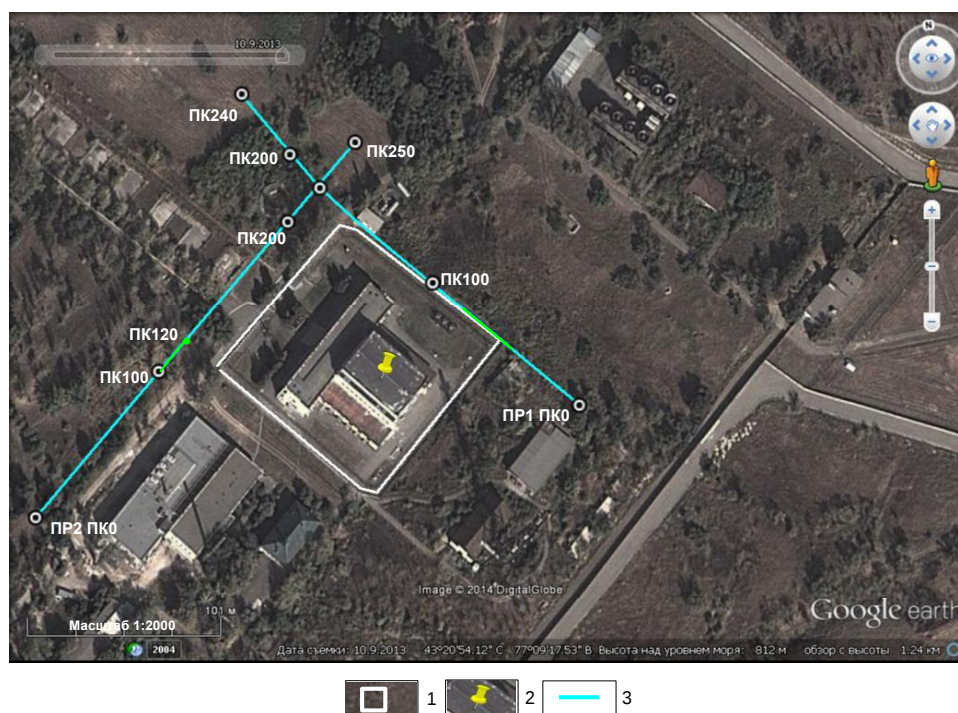
#### Методика и примеры результатов электроразведочных съемок при оценке динамики обводнения грунтов

Полевые наблюдения включали электроразведочную съёмку методом дипольного электрического зондирования с регистрацией вызванной поляризации (ДЭЗ-ВП) на площадке, прилегающей к реактору ВВР-К (рисунок 3), выполненную в сентябре 2016 и июне 2017 года.

Электроразведочные съёмки выполнялись 8-канальной установкой, приведённой на рисунке 4.

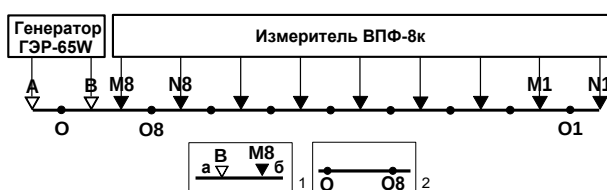
Измерения электрического сопротивления и поляризуемости проведены с использованием генератора ГЭР-65W-500V и измерителя ВПФ-210-8к (разработка РГП ИГИ-2015) с шагом 10 м. Погрешность измерений электрического сопротивления была не хуже  $\pm 0.1 \%$ , поляризуемости –  $\pm 0.02^\circ$ . По данным измерений построены геоэлектрические разрезы в параметрах электрического сопротивления  $\rho_k$  и поляризуемости  $\rho_{вп}$ .

По профилю 1, как показано на рисунке 5, разрез характеризуется блоковым строением.



1 – контур площадки реактора; 2 – здание реактора; 3 – профили электроразведочной съёмки

Рисунок 3. Площадка реактора ВВР-К ИЯФ. Система полевых электроразведочных съёмок в 2016-2017 годах



1 – точки заземления питающих (а) и приёмных (б) электродов;  
2 – расстояние между центрами пар питающих и приёмных электродов

Рисунок 4. Схема электроразведочной установки для наблюдений методом дипольного зондирования (ДЭЗ)

В 2016 году (рисунок 5 а, б) фланговые части (ПК 15–70 и ПК 190–240), где уровень грунтовых вод согласно [9] расположен на глубине порядка 40–45 м, характеризуются на глубину до 45 м повышенными значениями электрического сопротивления, пониженной поляризуемостью. По совокупности этих признаков и с учётом данных [6, 10] разрез фланговых частей проинтерпретирован как сложенный преимущественно песчано-гравийно-галечными грунтами в условиях естественной влажности. Центральная часть профиля 1 характеризуется в целом повышенной электропроводностью. Характерной его особенностью является аномально повышенная поляризуемость в интервале ПК 145–175. Также согласно [6, 10] полученные данные характеризуют в разрезе как слабо проницаемые суглинистые грунты.

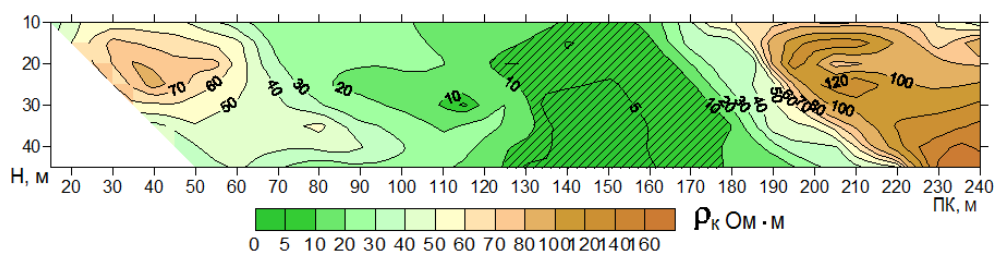
По данным измерений 2017 года в блоковой структуре разреза по этому же профилю в параметре

электрического сопротивления, как показано на рисунке 5, в, наибольшие изменения отмечены в центральной части (ПК 120–190). Электропроводящая зона с сопротивлением  $\rho_k$  менее 10 Ом $\times$ м приобрела четкую линейную форму с падением в северном направлении и горизонтальной мощностью порядка 20 м.

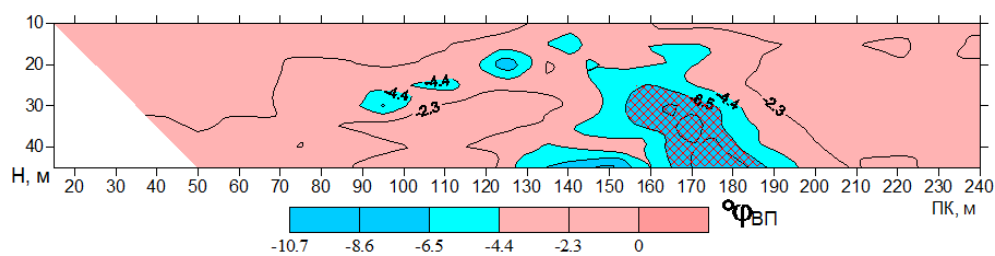
Произошли изменения значений электрического сопротивления в сторону его уменьшения и на фланговых участках профиля. В интервале профиля ПК 15–70 максимальные значения этого параметра снизились с 80 до 50 Ом $\times$ м, а в интервале ПК 190–240 – с 160 до 120 Ом $\times$ м. Конфигурация областей повышенных значений электрического сопротивления практически не изменилась.

В параметре поляризуемости, в соответствии с рисунком 5 г, наибольшие изменения также произошли в центральной части профиля. Если в 2016 г. зона с максимальной поляризуемостью картировалась на глубинах более 25 м, то в 2017 г. она существенно приблизилась к дневной поверхности и представлена, также как по данным  $\rho_k$ , линейно вытянутой структурой.

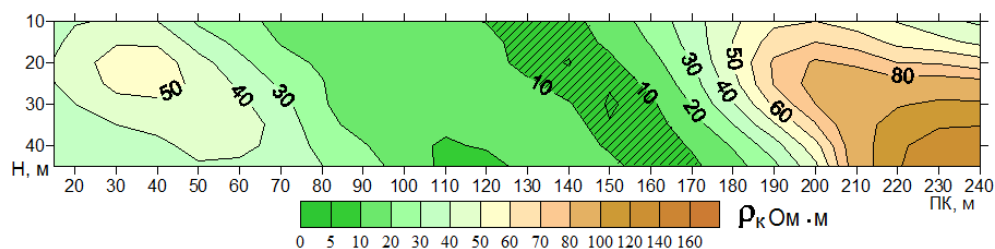
Принимая во внимание, что измерения 2016 года проводились в относительно сухой период, а 2017 года – в начале лета, в период большей остаточной весенней увлажнённости изучаемого разреза, предположено, наблюдаемые эффекты, наиболее вероятно связаны с динамикой обводнённости песчано-глинистых грунтов.



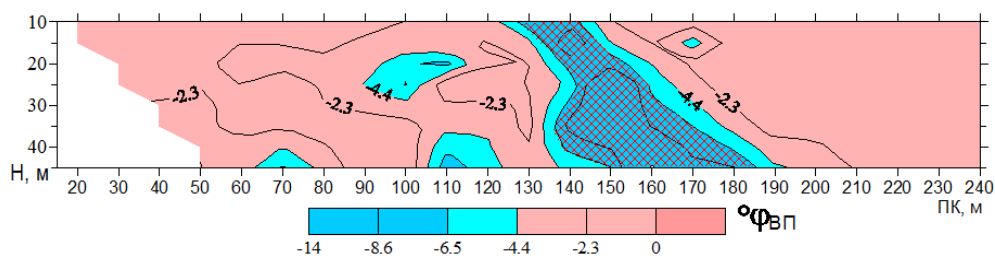
а) геоэлектрический разрез в параметре электрического сопротивления  $\rho_k$  (сентябрь 2016 г.)



б) геоэлектрический разрез в параметре поляризуемости  $\phi_{ВП}$  (сентябрь 2016 г.)



в) геоэлектрический разрез в параметре электрического сопротивления  $\rho_k$  (июнь 2017 г.)



г) геоэлектрический разрез в параметре поляризуемости  $\phi_{ВП}$  (июнь 2017 г.)



- 1 – изолинии кажущегося сопротивления  $\rho_k$ , области пониженных (а) и повышенных (б) значений этого параметра;  
2 – электропроводящие зоны по данным съёмок 2016 и 2017 г.г.; 3 – изолинии поляризуемости  $\phi_{ВП}$ , области фоновых (а) и аномально повышенных более стандартного отклонения от среднего (б) значений этого параметра;  
4 – зоны аномально повышенной поляризации по данным съёмок 2016 и 2017 г.г.

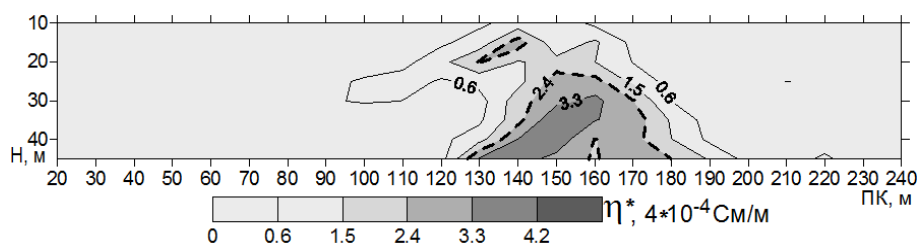
Рисунок 5. Площадка реактора ВВР-К ИЯФ, профиль 1. Геоэлектрические разрезы в параметрах электрического сопротивления  $\rho_k$  и поляризуемости  $\phi_{ВП}$  по данным съёмок 2016 и 2017 годов

Более контрастно, за счет исключения влияния электрического сопротивления на эффекты вызванной поляризации, проявлена динамика обводненности суглинистой части разреза в параметре относительной поляризуемости (рисунок 6).

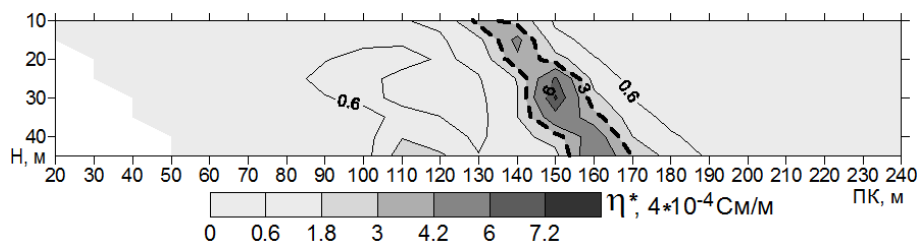
Как следует из полученных данных, осенью 2016 года (рисунок 6, а) глубина залегания наиболее увлажненных суглинков составляла порядка 22 метров и область увлажнения представляла собой куполообразную структуру. Увлажнение на меньших глу-

бинах проявлено фрагментарно в интервале ПК 125–140.

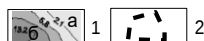
В 2017 году структура суглинистой части разреза в параметре относительной поляризации практически идентична разрезам  $\rho_k$  и  $\phi_{ВП}$ . Судя по изолиниям максимальных значений параметра  $\eta^*$  в 2016 и 2017 гг. (13,2 и 21,5 у.е. соответственно), полагается, что измерениями 2017 года с высокой степенью вероятности установлена повышенная обводненность суглинистой части разреза в период измерений.



а) геоэлектрический разрез в параметре относительной поляризуемости  $\eta^*$   
(съемка сентябрь 2016 г.)



б) геоэлектрический разрез в параметре относительной поляризуемости  $\eta^*$   
(съемка июнь 2017 г.)



1 – изолинии относительной поляризуемости, области, фоновых (а) и anomalously повышенных более стандартного отклонения от среднего (б) значений этого параметра; 2 – контуры локальной суглинистой неоднородности в песчано-гравийном грунте

Рисунок 6. Площадка реактора ВВР-К ИЯФ, профиль 1. Геоэлектрические разрезы  
в параметре относительной поляризуемости  $\eta^*$  по данным режимных съёмок

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью оценки информационных возможностей электроразведки в параметрах электрического сопротивления и поляризуемости для выявления и мониторинга изменений обводненности грунтов в местах расположения объектов атомной отрасли выполнен по литературным данным анализ геоэлектрических свойств песчано-глинистых грунтов и связи их с модулем деформации. Проведены полевые съёмки по апробации методических приемов измерений и обработки электроразведочных данных.

Получены следующие основные результаты:

1. Установлено наличие реальных предпосылок для оценки обводненности песчано-глинистых грунтов в параметрах электрического сопротивления и поляризуемости. Определен способ повышения достоверности данных электроразведки методом вы-

званной поляризации на основе исключения влияния электрического сопротивления за счет привлечения параметра относительной поляризации.

2. Показана взаимосвязь параметра относительной поляризации с модулем деформации. При установлении корреляционной зависимости между этими параметрами представляется возможным прогнозирование изменение несущих свойств грунтов по данным электроразведки.

3. По данным полевых электроразведочных наблюдений методом ДЭЗ-ВП получены сведения по динамике обводненности суглинистых грунтов в районе расположения реактора ВВР-К, чем подтверждена эффективность метода для выявления и мониторинга изменений обводненности песчано-глинистых грунтов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Постановление Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23 ноября 2006 г. № 5 Об утверждении и введении в действие руководства по безопасности «Мониторинг инженерно-геологических условий размещения объектов ядерного топливного цикла». Утверждено и введено в действие с 1 марта 2007 г. Руководство по безопасности «Мониторинг инженерно-геологических условий размещения объектов ядерного топливного цикла» (РБ 036-06).
2. Барац, Н.И. Механика грунтов: Учебное пособие. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2008. – 106 с.
3. Рекомендации по методике прогноза изменения строительных свойств структурно-неустойчивых грунтов при подтоплении/ПНИИИС. — М.: Стройиздат, 1984. – 156 с.
4. ПНИИИС Госстроя СССР. Рекомендации по геофизическим работам при инженерных изысканиях для строительства (электроразведка). Москва СТРОЙИЗДАТ 1984.
5. Жданов, М.С. Электроразведка. Учебник для вузов. – М.: Недра.1986. – 316 с.

6. Шарапанов, Н.Н. Методика геофизических исследований при гидрогеологических съёмках с целью мелиорации земель. / Н.Н. Шарапанов, Г.Я. Черняк, В.А. Барон // Недра, 1974. – 176 с.
7. Комаров, В.А. О природе электрических полей вызванной поляризации и возможностях их использования при поисках рудных месторождений / В.А. Комаров // Вестник Ленинградского гос. ун-та. Сер. геол. и геогр. 1957. – №16, – С. 37–46.
8. Рекомендации по методике прогноза изменения строительных свойств структурно-неустойчивых грунтов при подтоплении/ПНИИИС. – М.: Стройиздат, 1984. – 156 с.
9. Оценка фактической сейсмостойкости строительных конструкций здания реактора ВВР-К ИЯФ: отчёт о НИР (промежуточный): Институт геофизических исследований (РГП ИГИ); рук. Михайлова Н.Н.; исполн.: Шайторов В.Н. [и др.]. – Курчатов 2014. – 28 с.
10. Рыжов, А.А. Петрофизический подход к данным малоглубинной электроразведки / А.А. Рыжов (ВСЕГИНГЕО), В.А. Шевнин, Д.А. Квон (МГУ, Геологический ф-т) // Инженерная, угольная и рудная геофизика. – 2015. Современное состояние и перспективы развития. Сочи, 28.09–02.10.2015.

## **АТОМ САЛАСЫ ОБЪЕКТІЛЕРІ ОРНАЛАСҚАН ЖЕРЛЕРДЕ ГРУНТТАР СУЛАНУ ДИНАМИКАСЫН БАҒАЛАУ КЕЗІНДЕГІ ЭЛЕКТРБАРЛАУ (ЯФИ ССР-Қ ҮЛГІСІНДЕ)**

**М.В. Шульга, А.К. Жолдыбаев, Н.Н. Кушербаева**

*Қазақстан Республикасы Энергетика министрлігінің Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

ЯФИ ССР-Қ реакторы орналасқан аудандағы үлгісінде грунттардың электр кедергісінің әсерін жою есебінен жақсартылған, өндірілген поляризация әдісімен электрбарлауы қолданып құм-саз грунттардың геоэлектрикалық және деформациялық қасиеттерін талдамалы және эксперименттік зерттеулер нәтижелері келтірілген. Алынған деректер ұқсас геологиялық жағдайларда әлеуетті қауіпті учаскелердің қауіпсіздігін инженерлі-геологиялық мониторингі кезінде қолданылуы мүмкін.

## **ELECTRICAL SURVEY DURING THE ASSESSMENT OF THE DYNAMICS OF SUBSOIL UNUNDATION IN NUCLEAR ENERGY FACILITIES LOCATIONS (AT THE EXAMPLE OF VVR-K INP)**

**M.V. Shulga, A.K. Zholdybayev, N.N. Kusherbayeva**

*Institute of Geophysical Research of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan*

The paper demonstrates the results of analytical and experimental study of geo-electrical and deformation properties of sand-argillaceous soil with the application of electrical survey using method of induced polarization, improved at the account of exclusion of impact of electrical resistivity of the subsoil at the example of VVR-K, INP, reactor's location area. The obtained data can be used during engineering and geological monitoring of potentially hazardous objects' safety in similar geological conditions.

УДК 550.34.064

## СЕЙСМИЧНОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАЗАХСТАНА И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МОНИТОРИНГА ЭТОГО РЕГИОНА

Узбеков А.Н., Михайлова Н.Н.

*Институт геофизических исследований Министерства энергетики Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан*

Приводятся данные по территории Центрального Казахстана, ранее считавшейся асейсмичной, которые изменяют представление о ее сейсмичности и обосновывают необходимость проведения здесь систематического сейсмического мониторинга. Землетрясения Шалгинское 2001 г. и Карагандинское 2015 г. демонстрируют активную природную сейсмичность. Техногенная активность, проявленная высокой сейсмичностью, показана на примере месторождений Жезказган и Жолымбет.

### ВВЕДЕНИЕ

Геологическое строение Центрального Казахстана отличается большим разнообразием геологических структур, горных пород с различным периодом формирования от древних архейских образований до молодых четвертичных отложений. Это предопределяет наличие большого множества полезных ископаемых на данной территории. Центральный Казахстан является основным поставщиком меди и марганца в Республике. Здесь имеются значительные запасы вольфрам-молибденовых, свинцово-цинковых и баритовых руд, а также большие запасы высококачественных коксующихся и энергетических углей. В крайней юго-западной части Центрального Казахстана в Южно-Тургайской нефтеносной провинции выявлены месторождения нефти и газа.

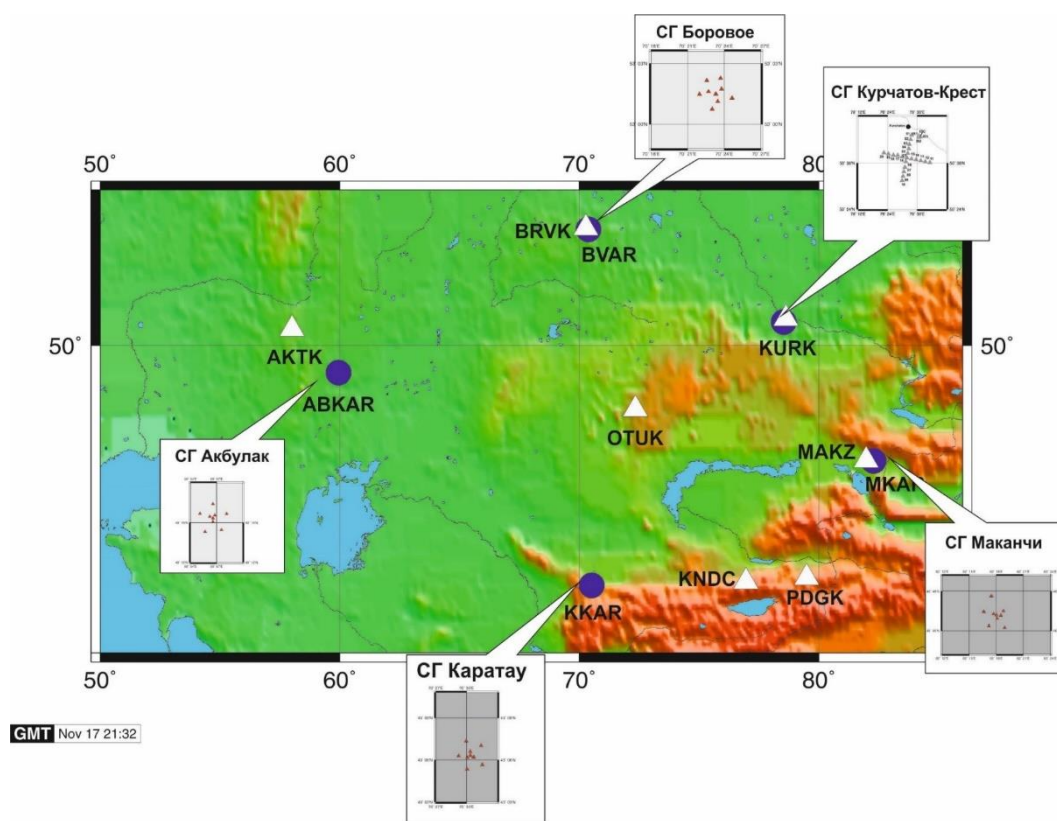
Центральный Казахстан традиционно считался асейсмичным на территории Республики. В действующей в настоящее время карте общего сейсмического районирования РК, входящей неотъемлемой частью в Строительные нормы и правила «Строительство в сейсмических районах» СНиП 2.03-30-2006 [1], весь Центральный Казахстан отнесен к асейсмичному региону, где не ожидаются сейсмические события с интенсивностью по шкале MSK-64 более 5. Многие десятилетия такой вывод не вызывал сомнений, сейсмичностью Центрального Казахстана специально исследователи не занимались. Данные по этому району не анализировались и не обрабатывались. В Казахстане составлялись в текущем режиме каталоги землетрясений только по территории Северного Тянь-Шаня и Джунгарии, а также частично по территории Восточного Казахстана [2]. Расположение сейсмических станций на территории Казахстана было напрямую связано с априорной информацией по сейсмичности о том, что сильные землетрясения происходят только в южном, юго-восточном и восточном Казахстане. Поэтому сеть станций была сконцентрирована именно в этих регионах Казахстана.

Взгляд на сейсмичность всей территории Казахстана, в том числе и Центрального Казахстана, изменился в связи с открытием новой системы наблюдений за землетрясениями и взрывами, оператором ко-

торой является Институт геофизических исследований МЭ РК. Как показали данные последних десятилетий, за пределами считавшихся сейсмически активными районов Казахстана также происходят землетрясения, среди которых наблюдаются и достаточно сильные, интенсивность которых превосходит или равна 5 баллам по шкале MSK-64. В частности, обнаружена сейсмическая активность в Центральном Казахстане. Несмотря на то, что в «слабосейсмичных» районах редко регистрируются слабые толчки, там могут происходить достаточно сильные землетрясения, наносящие ущерб существующей вблизи их очагов инфраструктуре [3].

В целях идентификации природы различных сейсмических событий проводятся специальные научные исследования, направленные на распознавание класса источников, в основном, взрывов и землетрясений. Для этого используются самые разные признаки -особенности волновой картины записей, корреляционный анализ, спектральный анализ, независимые данные о карьерах взрывания, космоснимки и др. Для Казахстана такие исследования особенно важны, поскольку ежегодно сейсмическими станциями регистрируются до 4 000 промышленных и других взрывов, связанных с активной разработкой месторождений полезных ископаемых, строительством дорог, плотин и т.д. Такое воздействие на недра и окружающую среду существенно осложняет изучение природных геодинамических и сейсмотектонических процессов.

В настоящей работе приведены данные о землетрясениях, зарегистрированных станциями ИГИ МЭ РК на территории Центрального Казахстана и включенными в сейсмические бюллетени национальной и глобальных служб. Как показывает практика и проведенные исследования, в Центральном Казахстане происходят разные по природе сейсмические события. Это могут быть либо природные тектонические землетрясения, либо природные землетрясения, спровоцированные продолжительной техногенной деятельностью на близлежащих карьерах, либо техногенные землетрясения непосредственно на месторождениях полезных ископаемых.



● – сейсмические группы, △ – трехкомпонентные станции.  
В отдельных сносах показана конфигурация сейсмических групп

Рисунок 1. Расположение станций на территории Казахстана, данные которых поступают в Центр данных KNDC

## 1. ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА

За последние 20 лет в Казахстане создана новая современная сеть высокотехнологичных сейсмических станций, интегрированных в Международные глобальные сети мониторинга. Эта система, в первую очередь, создавалась для обеспечения контроля за выполнением Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) и выполнения обязательств Казахстана, подписавшего в 1996 г. и ратифицировавшего в 2001 г. этот Договор. В течение 1994–2006 гг. по ряду международных соглашений построены и введены в строй новые сейсмические группы и трехкомпонентные станции, расположенные в основном по периметру территории Казахстана [4, 5]. Такая сеть позволяет вести мониторинг как внутри сети на казахстанской территории, так и вне ее. Отметим, что все данные этой сети в режиме реального времени поступают в Центр данных (KNDC) в г. Алматы.

На рисунке 1 показана схема расположения станций ИГИ РК МЭ, данные которых поступают в Центр данных в г. Алматы.

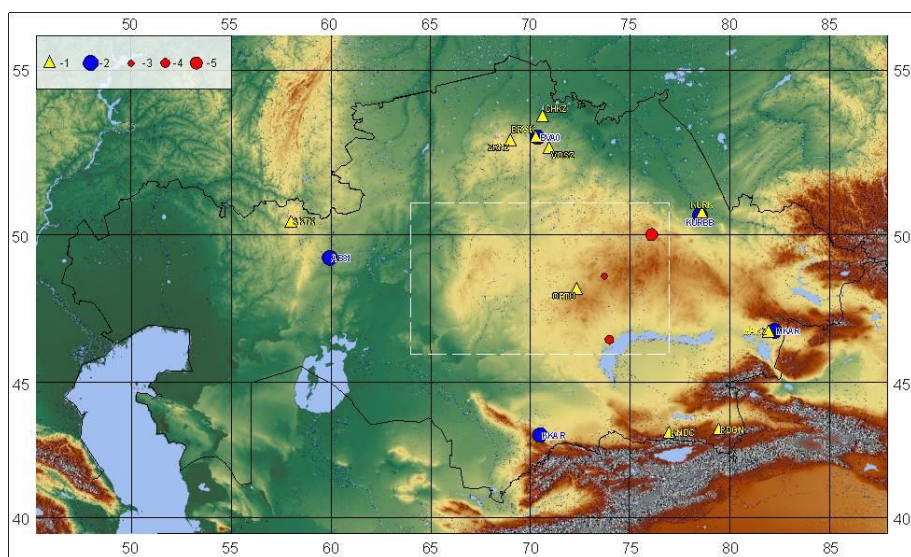
Обобщение всех сейсмологических данных по происшедшим землетрясениям, сопоставление этой информации с геологическими и тектоническими

данными, позволит установить связь конкретных очагов с тектоническими процессами в каждой сейсмогенерирующей зоне, а также определить характер действующих в регионе напряжений. Выявление таких связей очень важно для исследования считавшихся ранее асейсмичными районов Казахстана.

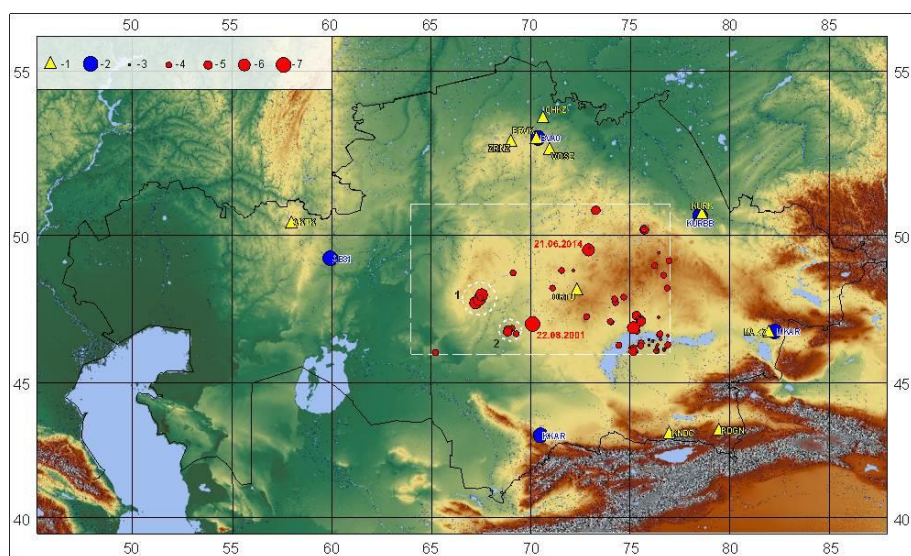
## 2. СВЕДЕНИЯ О НАИБОЛЕЕ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ В ЦЕНТРАЛЬНОМ КАЗАХСТАНЕ

На нижеприведенных картах эпицентров территории Казахстана представлены данные за два временных интервала: период с исторических времен до 1993 года (рисунок 2, а) и с 1994 года по 2018 г. (рисунок 2, б). Данные за первый период были собраны по имеющимся литературным источникам и материалам мировых сейсмологических центров данных. За первый период были отмечены только сильное землетрясение в 1925 году с эпицентром в хребте Муржик близ Семипалатинского испытательного полигона с магнитудой 5,8 и два более слабых землетрясения.

За второй период зарегистрировано более 40 землетрясений, наиболее сильное из которых Шалгинское землетрясение 2001 года с магнитудой  $M_{PV}=5,4$ , Карагандинское землетрясение с магнитудой  $m_{rv}=5,2$ , группы землетрясений на месторождениях Жезказган, Жомарт и др.



а) с исторических времен до 1993 года включительно



б) с 1994 по 2018 г.

1 – трехкомпонентная сейсмическая станция; 2 – сейсмическая группа; 3 – 7 энергетический класс землетрясений.  
Прямоугольной рамкой отмечена изучаемая область Центрального Казахстана.  
Внутри области выделены два месторождения: 1 – Жезказган, 2 – Жомарт

Рисунок 2. Карты эпицентров землетрясений Центрального Казахстана

Среди регистрируемых событий имеются землетрясения разной природы – это тектонические землетрясения, техногенные землетрясения (обрушения в шахтах и др.) и землетрясения, произошедшие в результате продолжительной взрывной активности при добыче полезных ископаемых вблизи месторождений (природно-техногенные). Наиболее сильные природные события – Шалгинское землетрясение 2001 г. и Карагандинское землетрясение 2014 г.

### Шалгинское землетрясение 2001 г.

Основные параметры землетрясения и его местоположение в сейсмотектоническом плане. Эпицентр Шалгинского землетрясения (таблица 1) располагается на западной границе Центрально-Казахстанского свода вблизи пересечения Жалаир-Найманского сдвига с поперечным региональным разломом, с которым связаны и эпицентры афтершоков [6]. Мощность земной коры в районе эпицентра составляет примерно 50 км.

Таблица 1. Окончательные инструментальные параметры Шалгинского землетрясения

| Дата, дд/мм/гггг | Время в очаге $t_0$ , чч:мм:сс | Широта $\varphi^\circ$ , с. ш. | Долгота $\lambda^\circ$ , в. д. | Глубина $h$ , км | $M_s$ | MPV | K    |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------|-------|-----|------|
| 22/08/2001       | 15:57:57,7                     | 47,20                          | 70,20                           | 19               | 5,0   | 5,4 | 13,2 |

### Макросейсмические параметры

Интенсивность сотрясений определялась по шкале MSK-64. Землетрясение вызвало 6-балльные колебания в эпицентральной области. В 43 км на северо-запад от инструментального эпицентра в поселке Шалгинский землетрясение ощутили большинство жителей, находившихся как в помещениях, так и вне их. Большинство построек в поселке представлено деревянными сборно-щитовыми, рублеными, шлакоблочными одноэтажными домами. В помещениях ощущалась сильная вибрация, качалась мебель, звенела посуда, качались люстры, в некоторых домах качались стены, полы, на крышах некоторых домов стучал шифер. В некоторых постройках образовались трещины, как правило, на стыке двух стен. Вибрация была сильной, сопоставимой с работой тяжелого грузовика, толкающего дом. Вибрация длилась 5–15 секунд. Люди слышали гул, который сопровождал вибрацию и прекратился с окончанием колебаний. Гул и колебания, по словам очевидцев, пришли в поселок с юго-западного направления. Люди, находившиеся во дворе дома, видели волну, распространявшуюся по земле, высотой 5–6 см, также пришедшую с юго-западного направления. В ряде населенных пунктов (Агадырь, Кызылтау, Каражал) землетрясение вызвало 5-балльные колебания. По результатам обследования была построена карта изосейст этого землетрясения [6] (рисунок 3).

Наблюдается четкая вытянутость изосейст в северо-восточном направлении. Это направление согласуется с направлением разлома северо-восточного простирания, который является ортогональным к разломам главного северо-западного направления в регионе. В результате макросейсмического обследования примерное положение макросейсмического эпицентра может быть описано следующими координатами: 47,17° северной широты и 70,30° восточной долготы (рисунок 3).

Обращает на себя внимание сильная вытянутость изосейст этого землетрясения по сравнению с изосейстами землетрясений в горных областях Казахстана. Это может быть свидетельством того, что в платформенной части Казахстана имеет место более слабое затухание сейсмических волн, обусловленное большей консолидированностью пород. Этому факту имеются подтверждения и по независимым исследованиям затухания сейсмических волн в разных

районах Казахстана. Для этого землетрясения был определен механизм очага, опубликованный в работе [7]. По нему можно сделать следующие выводы:

– Шалгинское землетрясение реализовалось в условиях напряжения горизонтального сжатия в северо-восточном направлении и горизонтального субширотного растяжения.

– В очаге произошло смещение блоков в виде правостороннего сдвига по простиранию плоскости северо-восточного направления, что согласуется с ориентацией разлома, к которому приурочен очаг.



Рисунок 3. Карта изосейст Шалгинского землетрясения 22.08.2001 г.

Полевыми станциями ИГИ были зарегистрированы шесть слабых афтершоков. Их параметры представлены в таблице 2.

Это землетрясение показало, что карта общего сейсмического районирования не дает полной картины сейсмической опасности в регионе Центрального Казахстана. Очаг с интенсивностью 6 баллов не был предсказан этой картой, на ней не были показаны сейсмогенерирующие зоны с таким сейсмopotенциалом. Эта информация послужила материалом для учета в новой разрабатываемой карте общего сейсмического зонирования территории Казахстана.

Таблица 2. Основные параметры афтершоков Шалгинского землетрясения

| № п/п | Дата, дд/мм/гггг | Время в очаге $t_0$ , чч:мм:сс | Широта, $\varphi^\circ$ , с. ш. | Долгота $\lambda^\circ$ , в. д. | Глубина $h$ , км | $M_{pva}$ | K   |
|-------|------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------|-----------|-----|
| 1     | 22/08/2001       | 18:37:01,0                     | 47,18                           | 70,24                           | 15               | 3,0       | 6,8 |
| 2     | 31/08/2001       | 05:18:21,4                     | 47,1754                         | 70,2631                         | 11,5             |           |     |
| 3     | 31/08/2001       | 22:53:59,8                     | 47,1648                         | 70,2264                         | 5                |           |     |
| 4     | 01/09/2001       | 19:53:47,6                     | 47,1782                         | 70,4873                         | 15               |           |     |
| 5     | 04/09/2001       | 22:35:56,4                     | 47,1711                         | 70,1780                         | 7                |           |     |
| 6     | 07/09/2001       | 08:53:24,8                     | 47,1273                         | 70,1393                         | 10               |           |     |

### Карагандинское землетрясение 2014 года

Основные параметры землетрясения и его местоположение в сейсмотектоническом плане. 21 июня 2014 года все сейсмические станции сети Института геофизических исследований РК зарегистрировали довольно сильное землетрясение в Центральном Казахстане. Землетрясение с эпицентром на север от Алматы – событие редкое, а особенно, если это ощутимое сильное землетрясение. Чаще в Центральном и Северном Казахстане регистрируются промышленные карьерные взрывы, связанные с разработкой полезных ископаемых. Наиболее близкая к эпицентру станция ИГИ Ортау находилась на расстоянии примерно 160 км от эпицентра. Записи получены также на станциях Боровое (432 км), Курчатов (426 км) и других более далеких станциях, которые входят и в мировые глобальные сети станций представлены на рисунок 4. Их данные автоматически передаются в международные центры – Европейский EMSC в Париже, в Американский NEIC, в Международный сейсмологический центр в Англии ISC.

Землетрясение было обработано в KNDC и в других Международных центрах данных. Решения разных центров по определению эпицентра практически совпадают. Координаты эпицентра варьируют в пределах сотых долей градуса, магнитуда  $m_b=4.8-5.2$ , глубина  $h=9-20$  км.

Основные параметры землетрясения приведены в таблице 3.

Сразу же после события стали поступать сведения о том, что землетрясение ощущалось в ряде населенных пунктов. Землетрясение ощущалось в г. Астана с интенсивностью 2 балла. Наиболее близким к эпицентру по предварительным данным оказался г. Абай, расположенный в 10 км на северо-запад от эпицентра. Город Караганда находился в 33 км от эпицентра. Расчетная интенсивность в эпицентре составляет 4–5 баллов.

Эпицентр землетрясения расположен на северной границе казахского щита вблизи южной границы карагандинского каменноугольного бассейна. Встал вопрос о природе этого реального события. Не являлось ли это событие взрывом? Не связано ли оно с интенсивными в этом районе работами на угольных шахтах? Является оно тектоническим или техногенным?

Предварительное рассмотрение тектонической обстановки района очага этого землетрясения показывает, что очаг землетрясения расположен на северной границе Успенской зоны смятия северо-восточного простирания шириной до 90 км, ограниченной субпараллельными тектоническими разломами (рисунок 5).

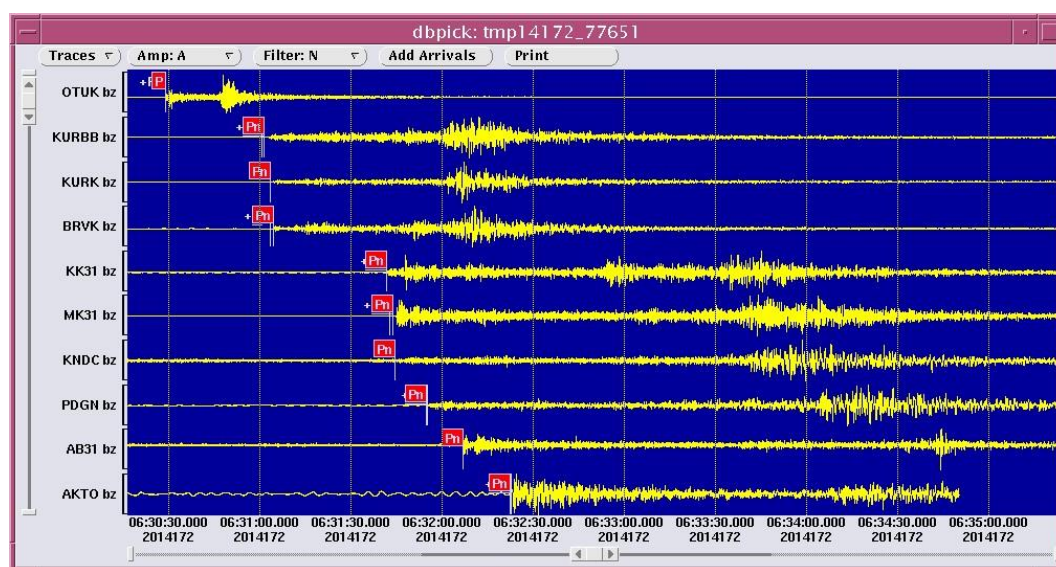
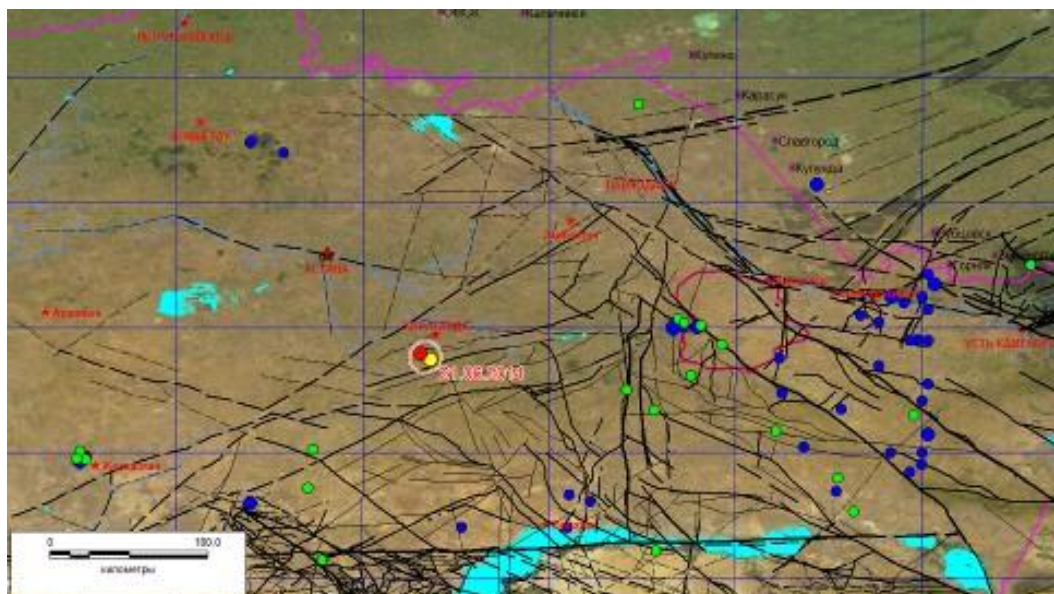


Рисунок 4. Записи Карагандинского землетрясения на станциях ИГИ (вертикальные компоненты)

Таблица 3. Основные параметры землетрясения близ г. Караганды

| Источник        | Широта $\varphi^\circ$ , с. ш. | Долгота $\lambda^\circ$ , в. д. | Время в очаге $t_0$ , чч:мм:сс | $m_b$ | K    | Глубина $h$ , км |
|-----------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------|------|------------------|
| EMSC (Франция)  | 49,57                          | 72,9                            | 6:30:04,3                      | 4,8   |      | 17               |
| ГС РАН (Россия) | 49,53                          | 72,98                           | 6:30:02,8                      | 5,0   | 12   | 20               |
| PK (KNDC+COMЭ)  | 49,56                          | 72,97                           | 6:30:03,4                      | 5,2   | 11,7 | 9                |



● и ● – эпицентры ранее произошедших землетрясений.  
В большом кружке – эпицентр 21.06.2014 г. по данным различных центров.  
Красный контур – границы Семипалатинского испытательного полигона

Рисунок 5. Положение эпицентра землетрясения на тектонической схеме

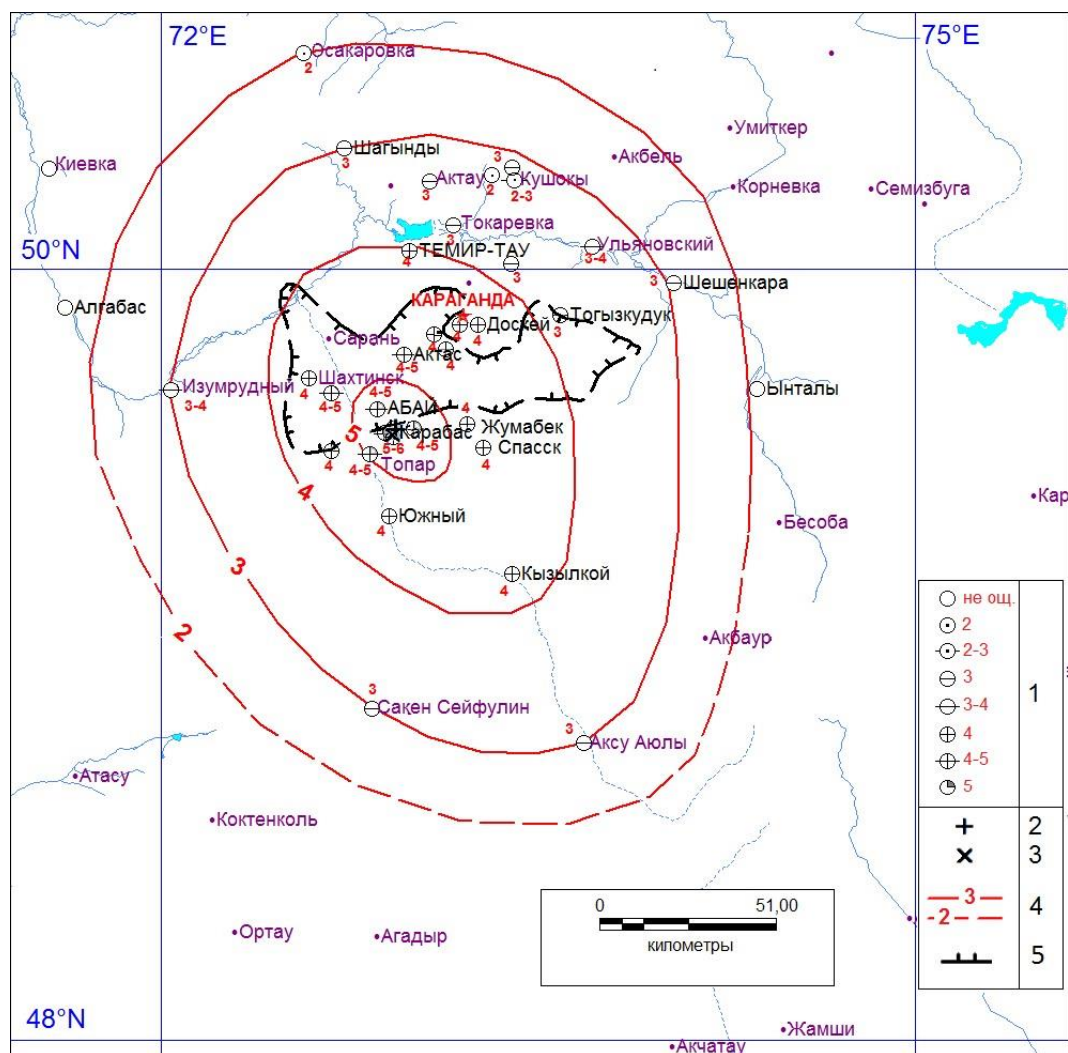
*Макросейсмические исследования.* Макросейсмическое обследование эпицентральной территории землетрясения проведено сотрудниками Института геофизических исследований Великановым А.Е. и Узбековым А.Н. через неделю после землетрясения с 28 июня по 3 июля. Обследование было проведено путём объезда 34 населённых пунктов на территории, радиусом чуть больше 100 км вокруг эпицентра произошедшего землетрясения и составления анкетированных опросов для установления фактической балльности в посещённых пунктах по шкале сейсмической интенсивности MSK-64. Маршруты объезда населённых пунктов совпадали с основными направлениями автодорожных трасс, расходящихся в различных направлениях от областного центра г. Караганды. В начале исследований основное внимание было уделено эпицентральной области в районе пос. Карабас, где в непосредственной близости от эпицентра было посещено пять объектов, на которых проведены опросы людей, осмотр местности с фотографированием объектов осмотра. Всего посещено 38 пунктов, проведено 50 опросов. По результатам макросейсмического обследования составлена таблица макросейсмических данных и построена карта изосейст (рисунок 6).

В результате макросейсмического обследования было установлено, что данное сейсмическое событие не является промышленным взрывом.

Далее для этого землетрясения был определен механизм очага. По результатам решения механизма очага, полученного Полешко Н.Н., землетрясение реализовалось в условиях близгоризонтальной и субмеридиональной ориентации оси напряжения

сжатия, и сублиротной, полого погружающейся оси напряжения растяжения. Такая система напряжений характерна для региона Центральной Азии. Тип подвижки в очаге характеризуется горизонтальным сдвигом с небольшой взбросовой составляющей по обоим возможным плоскостям разрыва. Ориентация одной из плоскостей согласуется с региональным разломом северо-восточного направления, отмеченного на схеме к югу от эпицентра. Другая возможная плоскость разрыва согласуется с ориентацией локальных разломов, секущих структуры в северо-западном направлении. Отметим, что подобный тип механизма очага является характерным для очагов землетрясений казахского щита (Шалгинского, Жезказганских, близ Семипалатинского полигона).

Поскольку из приведенных данных следует, что землетрясение 21 июня не является следствием взрыва или простого обрушения пород, а реализовалось в условиях регионального поля напряжения, под действием которого в очаге произошел разрыв, согласующийся с динамикой и ориентацией главных линеаментов региона, можно сделать вывод, что это тектоническое землетрясение. В пользу этого говорит и тот факт, что вслед за основным землетрясением примерно через 17 минут в том же очаге произошел афтершок. Второй толчок был очень слабым, его энергетический класс составил всего 5,2. В то же время, следует сказать, что не исключена возможность провоцирования такого землетрясения активной взрывной деятельностью в рядом расположенном карьере. Класс таких индуцированных землетрясений еще называют природно-техногенными [8].



1 – пункты и значения интенсивности сотрясений в баллах по шкале MSK-64;  
2, 3 – инструментальный и макросейсмический эпицентры соответственно;  
4 – изосейсты и значения балльности; 5 – границы Карагандинского бассейна (Карбасса)

Рисунок 6. Карта изосейст землетрясения 21 июня 2014 г. (составили Великанов А.Е., Узбеков А.Н.)

### Техногенные землетрясения в Центральном Казахстане

Техногенные землетрясения в Центральном Казахстане связаны с интенсивной разработкой месторождений твердых полезных ископаемых. Примером таких землетрясений могут являться землетрясения на месторождениях Жезказган и Жомарт.

Длительная разработка Жезказганского месторождения меди (более 160 лет) привела к существенным геодинамическим изменениям в геологической среде, которые проявились мощными техногенными землетрясениями. Самое сильное из них, с  $m_b=4.8$ ,  $M_s=4.5$ , произошло 1 августа 1994 г. на территории карьера Златоуст-Беловский вблизи г. Жезказган (рисунок 7).

Это было крупномасштабное обрушение, которое унесло жизни 6 человек, вызвало разрушение

множества действующих подземных выработок и зданий на поверхности. Проявления землетрясения были столь масштабными, что практически привели к полной остановке работ на одном из рудников, закрытию ряда шахт и переносу поверхностных строений из опасной зоны. Были искорежены рельсовые пути, опрокинуты вагоны [9, 10].

Другое событие, произошедшее 23.06.1996 г. в районе Жезказганского месторождения ( $M_s=3.7$ ), ощущалось в п. Каражал (эпицентральное расстояние  $\Delta=243$  км), п. Агадырь ( $\Delta=398$  км) с интенсивностью 3 балла. Станциями ИГИ зарегистрированы также события 09.09.2002 ( $M_s=4.4$ ) и 23.06.2005 ( $M_s=4.0$ ). В таблице 4 приведены параметры наиболее сильных сейсмических событий ( $m_{pv} \geq 3.7$ ) вблизи г. Жезказган.

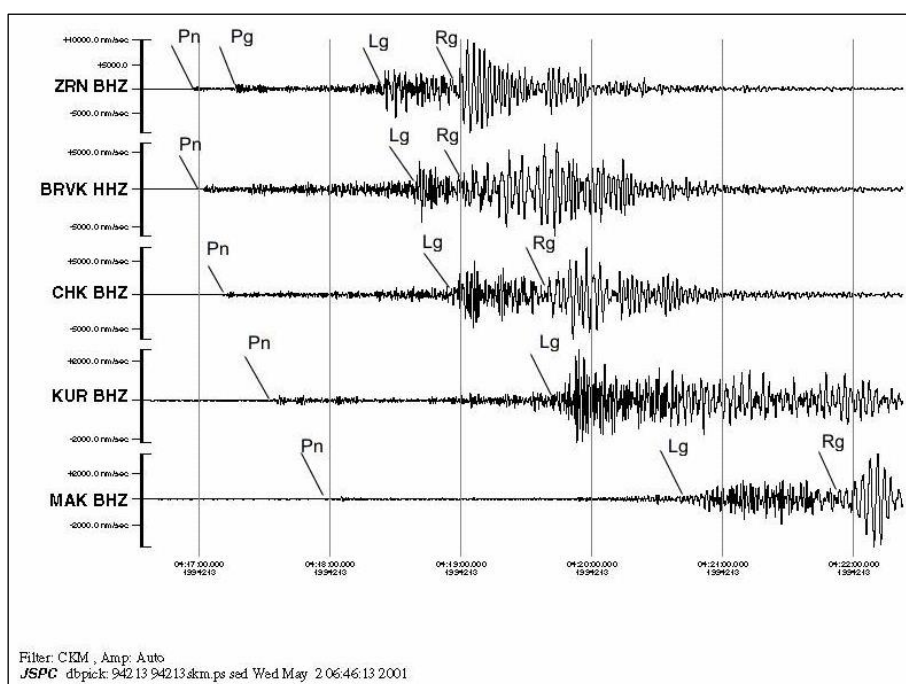


Рисунок 7. Район Жезказгана. Сейсмические записи события 1 августа 1994 г.  $t_0=04:15:39,7$ ,  $\varphi=47,833^\circ$ ,  $\lambda=67,451^\circ$ ,  $m_b=4,8$ ,  $K=12,2$ . Станции ИГИ. Z-компонента

Таблица 4. Параметры сейсмических событий вблизи г. Жезказган

| Дата, дд/мм/гггг | Время в очаге $t_0$ , чч:мм:сс | Широта $\varphi^\circ$ , с. ш. | Долгота $\lambda^\circ$ , в. д. | Глубина $h$ , км | $m_{pva}$ | $M_s$ | K    |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------|-----------|-------|------|
| 01/08/1994       | 04:15:39,7                     | 47,833                         | 67,451                          | 0                | 4,8       | 4,5   | 12,2 |
| 17/07/1995       | 19:08:30,9                     | 47,973                         | 67,699                          | 0                | 3,9       |       | 10,4 |
| 23/06/1996       | 18:28:25,8                     | 47,8643                        | 67,618                          | 0                | 4,3       |       | 10,9 |
| 01/08/1996       | 00:06:04,5                     | 47,9284                        | 67,6856                         | 0                | 4         |       | 10,4 |
| 09/09/2002       | 22:27:01,3                     | 47,873                         | 67,573                          | 0                | 4,6       | 3,8   | 11,0 |
| 23/06/2005       | 18:00:07,6                     | 47,9059                        | 67,4092                         | 0                | 4,1       | 3,5   | 10,4 |
| 16/01/2009       | 22:18:29,8                     | 47,8672                        | 67,4203                         | 0                | 3,7       |       | 9,4  |
| 19/03/2009       | 19:08:46,6                     | 47,934                         | 67,6777                         | 0                | 4,3       |       | 10,4 |
| 11/06/2009       | 06:05:49,9                     | 47,8672                        | 67,5424                         | 0                | 3,9       |       | 10,3 |

Из таблицы 4 видно, что после 2009 г. сильных событий в районе Жезказганского месторождения не было. Это связано с тем, что, начиная с 2010 г. изменилась технология подземной добычи руды с исключением опасной отработки богатых содержанием металла горных целиков, оставшихся со времен СССР, которые к тому времени были все отработаны. В настоящее время подземная добыча проводится в меньших объемах, большая часть добычных работ ведется с поверхности в открытых горных выработках (карьерах).

В последний год начало активно проявлять себя в сейсмическом отношении месторождение Жомарт. Только за последние полгода произошло три достаточно сильных землетрясения на месторождении Жомарт. Последнее из них 24 марта 2018 года является и самым сильным. Его магнитуда равна 4,0. Его зарегистрировали практически все сейсмические

станции ИГИ. На рисунке 8 показаны сейсмические записи этого события.

Сейсмическая жизнь в Центральном Казахстане продолжается. Для детального анализа происходящих здесь процессов и возможного прогноза техногенных явлений необходимо создавать специальные сети мониторинга сейсмических событий на месторождениях. Чтобы изучить закономерности подготовки сильных техногенных землетрясений, а также для успешной регистрации слабых событий, проводящийся здесь карьерных и шахтных взрывов Институт геофизических исследований провел первый этап работ по созданию проекта такой сети в составе 40 станций. На рисунке 9 показана предлагаемая сеть мониторинга.

Только при взаимодействии региональной и специальных сетей мониторинга на месторождениях можно обеспечить сейсмическую безопасность проводимых работ.

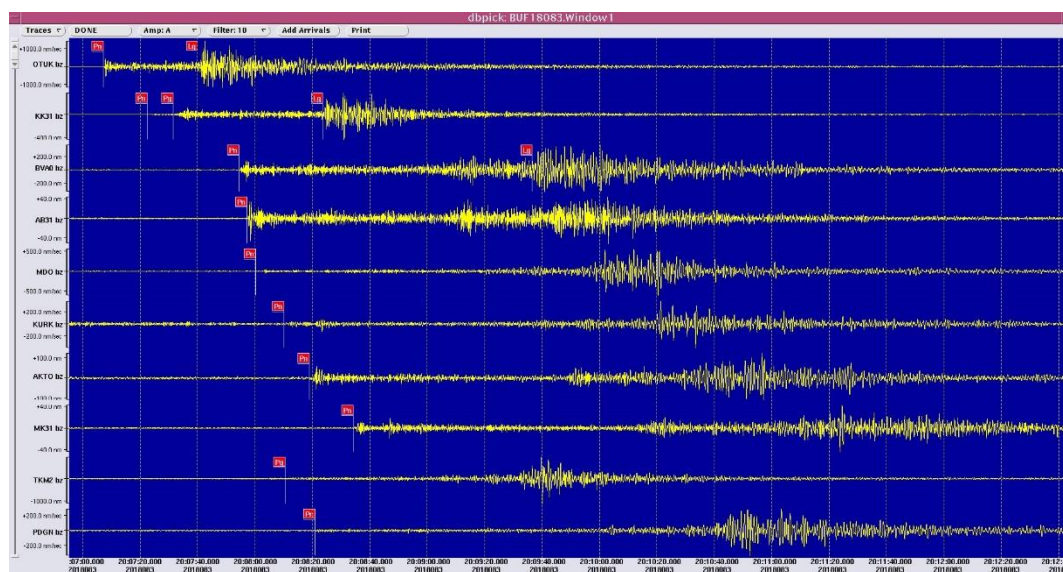


Рисунок 8. Записи землетрясения на станциях, данные которых поступают в Центр данных ИГИ

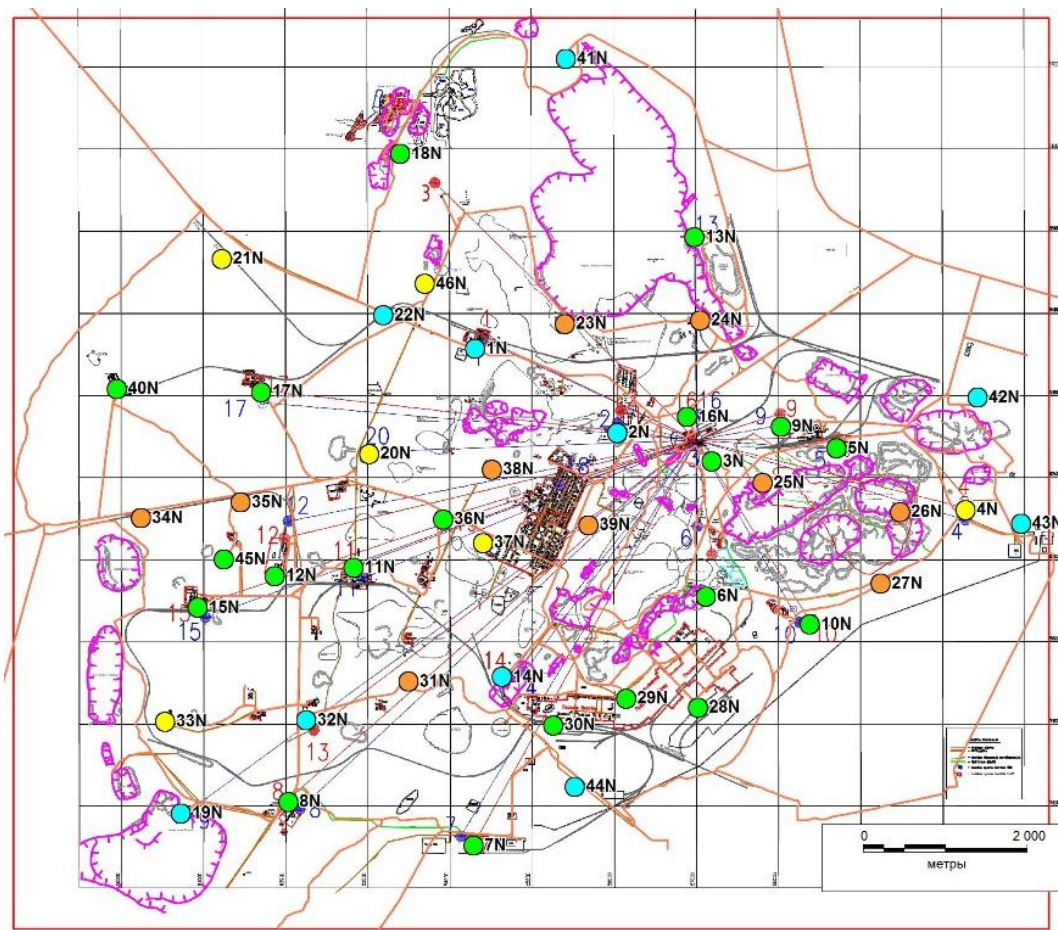


Рисунок 9. Картографическая схема пространственного расположения выбранных мест установки сейсмических станций для новой модернизированной сети сейсмических наблюдений на территории месторождения Жезказган

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе проведенных исследований получены следующие основные результаты:

– Новая сеть сейсмических наблюдений ИГИ позволила получить новые данные по сейсмичности ряда районов Казахстана, ранее считавшихся асейсмичными. Выявлены особенности проявления очагов в платформенных структурах и освещен вопрос о природе сейсмических событий.

– Для многих районов Казахстана новый инструментальный уровень мониторинга дал возмож-

ность получить представительную статистику по землетрясениям, взрывам на карьерах и в шахтах, техногенным событиям.

– Показано, что, несмотря на ощутимый прогресс в изучении сейсмических событий в слабоактивных районах Казахстана, в этой новой для сейсмологов области остаются нерешенными многие вопросы, относящиеся как к техническим, так и к методическим областям.

## ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП РК 2.09-90-2006. Строительство в сейсмических районах. /Издание официальное. Алматы 2006 г.
2. Михайлова, Н.Н. Каталог землетрясений Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий часть 1 1975–1982 гг. // Алма-Ата «Наука» Казахской ССР 1990. – С. 19–158.
3. Михайлова, Н.Н. О сейсмических событиях в малоактивных и асейсмичных районах Казахстана. / Н.Н. Михайлова, А.И. Неделков., И.Н. Соколова // Современная геодинамика, глубинное строение и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов – Воронеж, 2001. – С. 131–133.
4. 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.
5. Беляшова, Н.Н. Вместе с организацией по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний в поддержку безъядерного мира / Н.Н. Беляшова, Н.Н. Михайлова // Вестник НЯЦ РК. – 2008. – Вып. 2. – С. 5–15.
6. Михайлова Н.Н. Шалгинское землетрясение в Центральном Казахстане «Геофизика и проблемы нераспространения» 22.08.2001 г. / Михайлова Н.Н., Неделков А.И., Соколова И.Н., Казаков Е.Н., Беляшов А.В. // Вестник НЯЦ РК. – 2002. – Вып.2. – С. 78–87.
7. Михайлова, Н.Н. Об землетрясении близ Караганды 21 июня 2014 года / Н.Н. Михайлова [и др.] // Вестник НЯЦ РК. – 2015. – Вып.3. – С. 94–100.
8. Адушкин, В.В. Сейсмичность взрывных работ. Техногенная сейсмичность / В.В. Адушкин, В.И. Куликов, Л.М. Перник / Взрывы и землетрясения на территории Европейской части России // Москва. – 2013. – С. 86–130.
9. Сатов, М.Ж. Мониторинг горного массива по данным сдвижения горных пород / М.Ж. Сатов // Горный журнал. – 1999. – № 3 – С. 44–47.
10. Сатов, М.Ж. Сейсморайонирование месторождения по данным приборного контроля / М.Ж. Сатов // Горный журнал. 1999. – № 3. – С. 14–16.

## ОРТАЛЫҚ ҚАЗАҚСТАННЫҢ СЕЙСМИКАЛЫЛЫҒЫ ЖӘНЕ ОСЫ АЙМАҚТЫҢ МОНИТОРИНГІНІҢ ДАМУЫ БАҒЫТТАРЫ

А.Н. Узбеков, Н.Н. Михайлова

*Қазақстан Республикасы Энергетика министрлігінің Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

Бұрын асейсмикалық болып саналатын Орталық Қазақстанның аумағы бойынша деректері келтіріледі, ол деректер аймақтың сейсмикалалығы туралы ұғынымдарды өзгертеді де осында жүйелі сейсмикалық мониторинг жүргізу қажеттілігін негіздейді. 2001 ж. Шалғы және 2015 ж. Қарағанды жерсілкінулері белсенді табиғи сейсмикалалықты көрсетеді. Жоғары сейсмикалалығымен көрінетін техногендік белсенділігі Жезқазған және Жолымбет кенорындары үлгілерінде көрсетілген.

## SEISMICITY IN CENTRAL KAZAKHSTAN AND DIRECTIONS OF MONITORING DEVELOPMENT OF THIS REGION

A.N. Uzbekov, N.N. Mikhailova

*Institute of Geophysical Research of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan*

The data are presented on the territory of Central Kazakhstan, which earlier was considered as aseismic one. These data change the perception about its seismicity and justify the need for the systematic seismic monitoring here. Shalginskoye earthquake of 2001 and Karagandinskoye of 2015 show active natural seismicity. Man-induced activity manifested by high seismicity is shown at the example of Zhezkazgan and Zholymbet fields.

УДК 539.23; 539.216.1

## ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ Cu ПЛЕНОК В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ИОНОВ

<sup>1,2)</sup> Калиекперов М.Е., <sup>1,2)</sup> Шлимас Д.И., <sup>1,2)</sup> Козловский А.Л., <sup>1)</sup> Кадыржанов К.К.

<sup>1)</sup> Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

<sup>2)</sup> Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

В работе представлены результаты исследований влияния облучения низкоэнергетичными ионами  $\text{He}^{+2}$  с энергией 30 кэВ (15 кэВ на заряд) на структурные свойства Cu пленок. В результате облучения исходных образцов ионами  $\text{He}^{+2}$  дозой  $1 \cdot 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> наблюдается изменение морфологии поверхности Cu пленок, образование наноразмерных включений шестигранной формы. Увеличение дозы облучения до  $1 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> и выше приводит к формированию трещин и аморфных оксидных включений на поверхности образца. Установлено, что увеличение дозы облучения приводит к снижению степени кристалличности и изменению основных кристаллографических характеристик.

### ВВЕДЕНИЕ

На протяжении достаточно длительного времени тонкие пленки привлекают внимание исследователей в различных отраслях науки и техники [1–3]. Данный интерес обусловлен уникальностью физических свойств и постоянно расширяющимися возможностями их применения [4–6]. Известно, что переход от массивных материалов к тонким пленкам позволяет произвести повышение уровня некоторых эксплуатационных свойств. При переходе к кристаллитам малых размеров происходит существенное изменение свойств материала, связанное с изменением параметра решетки. Наблюдается скачкообразное повышение твердости и износостойкости. Также к преимуществам тонкопленочных покрытий можно отнести к коррозии и окислению [7–10]. При этом для практического применения тонких пленок в микроэлектронике необходимо знать их устойчивость к различным внешним воздействиям таким как ионизирующее излучение, термическая обработка, коррозия, которые могут привести к существенному изменению структурных свойств. Особое внимание в радиационном материаловедении занимает область изучения влияния низкоэнергетичных ионов на процессы дефектообразования в материалах. Это обусловлено тем, что облучение большинства чистых металлов ионами гелия и другими инертными газами приводит к таким явлениям как формирование в объеме и приповерхностных слоях газовой пористости, дрейфу газовых пузырьков к поверхности (блистерингу), шелушению поверхности (флекингу) и свеллингу. В связи с чем, представляет огромный интерес изучение влияния низкоэнергетичных ионов  $\text{He}^{+2}$  на изменение морфологии и структурных свойств Cu пленок, полученных методом электрохимического осаждения на полимерные подложки.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Электрохимический синтез Cu пленок на полимерные подложки проводился в потенциостатическом режиме при напряжении 1,25 В в течение одного часа. Состав раствора электролита:  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

(238 г/л),  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (21 г/л). Выход меди по току из сернокислых растворов электролитов составляет 100 %. Контроль за процессом формирования пленок осуществлялся методом хроноамперометрии мультиметром «Agilent 34410A».

Исследование структурных характеристик и элементного состава тонких пленок проводилось с использованием растрового электронного микроскопа «Hitachi TM3030» с системой микроанализа «Bruker XFlash MIN SVE» при ускоряющем напряжении 15 кВ. Рентгеноструктурный анализ проводился на дифрактометре D8 ADVANCE ECO (Bruker, Германия) при использовании излучения  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1,54060 \text{ \AA}$ ). Для идентификации фаз и исследования кристаллической структуры использовалось программное обеспечение Bruker AXSDIFFRAC. EVA v.4.2 и международная база данных ICDD PDF-2.

Исследование радиационной стойкости тонких пленок проводилось путем облучения ионами гелия с энергией 15 кэВ/заряд на низкоэнергетическом канале ускорителя тяжелых ионов ДЦ-60 (канал ЭЦР - источника) до ионных флюенсов от  $1 \cdot 10^{16}$  до  $3 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>. Для обеспечения высокого вакуума в камере третьего канала применялась двухступенчатая система откачки. По достижении  $5 \cdot 10^{-5}$  Торр камеру объединяют с каналом транспортировки. Образцы в камере прикрепляются к электрически изолированному, охлаждаемому держателю мишеней. Съем заряда с мишени позволяет контролировать набранный мишенью флюенс. Для повышения точности измерения в камере перед мишенью установлена магнитная система подавления вторичной эмиссии электронов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате облучения исходных образцов ионами  $\text{He}^{+2}$  дозой  $1 \cdot 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> наблюдается изменение морфологии поверхности Cu пленок, образование наноразмерных включений шестигранной формы, появление которых может быть обусловлено перестройкой кристаллической структуры за счет тер-

мических процессов рекристаллизации в результате взаимодействия ионов  $\text{He}^{+2}$  с зернами Cu (рисунок 1).

Увеличение дозы облучения до  $1 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> и выше приводит к формированию трещин на поверхности образца, что может быть обусловлено процессами свеллинга и охрупчивания. При этом при больших дозах облучения наблюдается формирование оплавленных областей и уменьшение размеров зерен. Анализ аморфных образований и трещин с помощью энерго-дисперсионного анализа позволил определить, аморфные включения содержат кислород и представляют собой оксидное соединение меди нестехиометрического состава.

Для определения влияния облучения на структурные свойства Cu пленок был применен метод

рентгеноструктурного анализа (РСА). На рисунке 2 представлены рентгеновские дифрактограммы исследуемых образцов, подверженных облучению потоком ионов  $\text{He}^{+2}$ . Форма пиков на дифрактограммах для исследуемых образцов указывает на поликристаллическую структуру. Исходный образец представляет собой однофазную структуру с гранцентрированной кубической фазой пространственной группы Fm-3m(225), без оксидных соединений. Отклонение формы пиков от симметричной формы свидетельствуют о микронапряжениях в кристаллической структуре, наличие которых обусловлено образованием дефектов в структуре процессом синтеза.

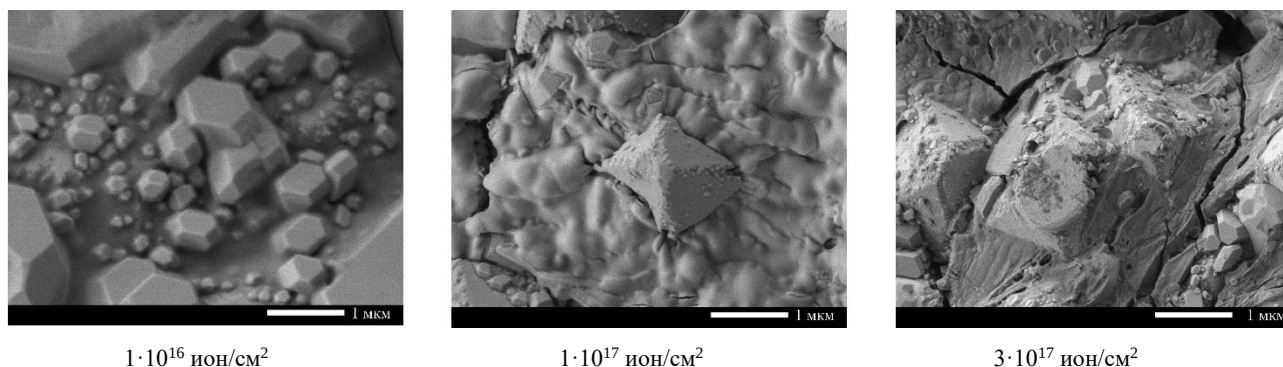


Рисунок 1. РЭМ изображения изменения морфологии поверхности Cu пленок

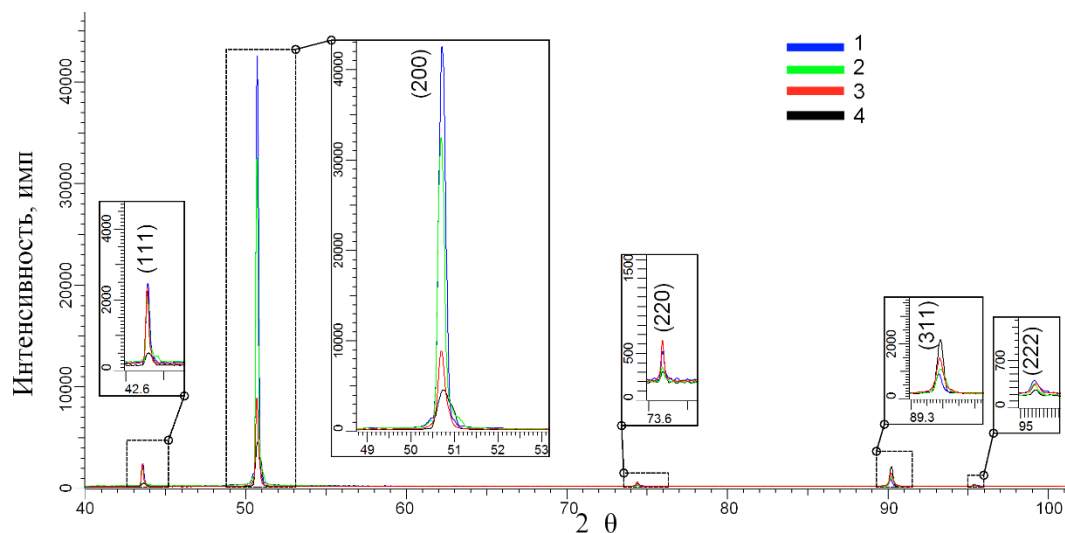


Рисунок 2. Рентгеновские дифрактограммы Cu пленок: 1) исходный; 2)  $1 \cdot 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>; 3)  $1 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>; 4)  $3 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>

В процессе облучения наблюдается изменение интенсивности пиков и небольшое смещение дифракционных максимумов, что обусловлено изменением концентрации дефектов и вакансий в кристаллической структуре. При этом на дифрактограммах облученных образцов не наблюдается появление новых пиков, характерных для новых фаз или оксидных соединений, что свидетельствует об отсутствии

окислительных процессов в результате облучения. Отсутствие пиков, характерных для оксидов меди, и наличие нестехиометрических оксидных образований на поверхности может быть объяснено тем фактом, что формирование оксидных соединений происходит только в малом приповерхностном слое. Оксидные соединения на поверхности обладают аморфной структурой и не могут быть зарегистри-

рованы методом PCA. Согласно результатам моделирования взаимодействия низкоэнергетичных ионов  $\text{He}^{+2}$  с кристаллической структурой Cu пленок, выполненным с помощью программного обеспечения SRIM PRO 2013, максимальная длина пробега ионов  $\text{He}^{+2}$  составляет 160–170 нм, при этом радиальный разброс составляет 110–115 нм. При этом в результате одного акта взаимодействия ионов  $\text{He}^{+2}$  с атомом мишени в структуре может образоваться ~80 вакансий/ион, а энергетические потери на ионизацию составляют 82 %. При энергии образования вакансии в результате взаимодействия 0,26 эВ в кристаллической структуре способно образоваться большое количество вторичных дефектов, которые обладают большой подвижностью и способны к миграции по структуре. При этом каскады вторичных дефектов состоят из френкелевских пар в виде межузельных атомов и вакансий. При повышении содержания дефектов в результате некомпенсированности вакансионных стоков происходит увеличение объема — распухание и образование аморфных включений (рисунок 1), что объясняет формирование оксидных включений на поверхности.

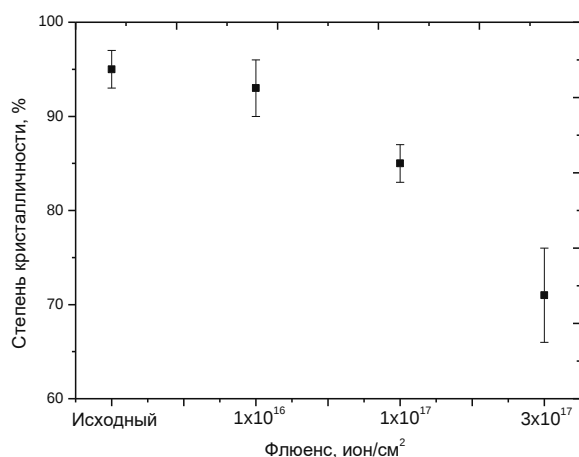


Рисунок 3. График зависимости изменения степени кристалличности от дозы облучения

## ЛИТЕРАТУРА

- Kim J. Y., Kim Y. G., Stickney J. L. Cu nanofilm formation by electrochemical atomic layer deposition (ALD) in the presence of chloride ions //Journal of Electroanalytical Chemistry. – 2008. – V. 621. – №. 2. – P. 205–213.
- Huang C. et al. Electron mean free path model for rectangular nanowire, nanofilm and nanoparticle //Physica B: Condensed Matter. – 2014. – V. 438. – P. 17–21.
- Gebregziabihir D. K. et al. Electrochemical atomic layer deposition of copper nanofilms on ruthenium //Journal of Crystal Growth. – 2010. – V. 312. – №. 8. – P. 1271–1276.
- Hao J. et al. Surface modification of silver nanofilms for improved perchlorate detection by surface-enhanced Raman scattering //Journal of colloid and interface science. – 2012. – V. 377. – №. 1. – P. 51–57.
- Gao Y. et al. Radiation tolerance of Cu/W multilayered nanocomposites //Journal of Nuclear Materials. – 2011. – V. 413. – № 1. – P. 11–15.
- Liu X. et al. A high-performance UV/visible photodetector of Cu<sub>2</sub>O/ZnO hybrid nanofilms on SWNT-based flexible conducting substrates //Journal of Materials Chemistry C. – 2014. – V. 2. – №. 44. – P. 9536–9542.
- Hong M. et al. Size-dependent radiation tolerance and corrosion resistance in ion irradiated CrN/AlTiN nanofilms //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2015. – V. 342. – P. 137–143.

Аппроксимация линий на рентгеновских дифрактограммах необходимым числом симметричных функций псевдо-Фойгта позволила определить ширину зарегистрированных линий FWHM, необходимую для характеристики совершенства кристаллической структуры и оценки влияния облучения на степень кристалличности. Результаты представлены на рисунке 3.

Как видно из представленных данных увеличение дозы облучения приводит к снижению степени кристалличности и образованию аморфных включений, которые обусловлены миграцией дефектов в структуре приповерхностного слоя. При этом каскады дефектов способны проникать в кристаллическую структуру достаточно глубоко и могут оказывать влияние на изменение основных параметров кристаллической структуры. Увеличение параметра кристаллической решетки и среднего размера кристаллитов может быть объяснено увеличением тепловых колебаний решетки в результате облучения, а также образованием и дальнейшей миграцией каскадов вторичных дефектов, которые приводят к возникновению в структуре локальных областей нагрева.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате облучения исходных образцов ионами  $\text{He}^{+2}$  дозой  $1 \cdot 10^{16}$  ион/см² наблюдается изменение морфологии поверхности Cu пленок, образование наноразмерных включений шестигранной формы. Увеличение дозы облучения до  $1 \cdot 10^{17}$  ион/см² и выше приводит к формированию трещин и аморфных включений на поверхности образца. Анализ аморфных образований и трещин показал, что аморфные включения представляют собой оксидное соединение меди нестехиометрического состава. Установлено, что увеличение дозы облучения приводит к снижению степени кристалличности и изменению основных кристаллографических характеристик.

*Работа выполнена в рамках Грантового финансирования МОН РК по договору №132 от 12 марта 2018 года.*

8. Dong L. et al. Period-thickness dependent responses of Cu/W multilayered nanofilms to ions irradiation under different ion energies //Journal of Nuclear Materials. – 2017. – V. 497. – P. 117–127.
9. Wang L. et al. The Evolution Behavior of Defects in the Nanofilms of W/Cu and W Probed by Doppler Broadening Positron Annihilation Spectroscopy //Defect and Diffusion Forum. – Trans Tech Publications, 2016. – V. 373. – P. 104–107.
10. Wang H. et al. Enhanced radiation tolerance of YSZ/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> multilayered nanofilms with pre-existing nanovoids //Acta Materialia. – 2018. – V. 144. – P. 691–699.

### ТӨМЕН ЭНЕРГИЯЛЫ ИОНДАРДЫҢ ӘСЕРІ НӘТИЖЕСІНДЕ Cu ПЛЕНКАЛАРЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНІҢ ӨЗГЕРУІ

<sup>1,2)</sup> М.Е. Калиекперов, <sup>1,2)</sup> Д.И. Шлимас, <sup>1,2)</sup> А.Л. Козловский, <sup>1)</sup> К.К. Кадыржанов

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

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

Жұмыста Cu пленкаларының құрылымдық қасиеттеріне энергиясы 30 кэВ (зарядқа 15 кэВ) төмен энергиялы He<sup>+2</sup> иондарымен сәулелендіру әсерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Бастапқы үлгілерді He<sup>+2</sup> иондары арқылы  $1 \cdot 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> дозасымен сәулелендіру нәтижесінде, Cu пленкалары бетінің морфологиясының өзгеруі байқалып, алты қырлы пішінді наноөлшемді қосылыстардың пайда болуы байқалады. Сәулелендіру дозасын  $1 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> дейін және одан жоғары көтеру үлгі бетінде жарықтар мен аморфты оксидті қосылыстардың пайда болуына әкеледі. Сәулелендіру дозасын жоғарылату кристалдық дәрежесінің төмендеуіне және негізгі кристаллографиялық сипаттамалардың өзгеруіне әкелетіні анықталды.

### CHANGES OF STRUCTURAL PROPERTIES OF Cu FILMS AS RESULTS OF IMPACT OF LOW-POWER ENERGY IONS

<sup>1,2)</sup> M.E. Kaliekperov, <sup>1,2)</sup> D.I. Shlimas, <sup>1,2)</sup> A.L. Kozlovskiy, <sup>1)</sup> K.K. Kadyrzhanov

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

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

In this paper, we present the results of studies of the irradiation effect with low-energy He<sup>+2</sup> ions with an energy of 30 keV (15 keV per charge) on the structural properties of Cu films. As a result of irradiation of initial samples with He<sup>+2</sup> ions with a dose of  $1 \cdot 10^{16}$  ion/cm<sup>2</sup>, a change in the Cu surface morphology of films is observed, and the formation of nanoscale inclusions of hexagonal shape is observed. An increase in the irradiation dose to  $1 \cdot 10^{17}$  ion/cm<sup>2</sup> and higher leads to the formation of cracks and amorphous oxide inclusions on the sample surface. It is established that an increase in the irradiation dose leads to a decrease in the degree of crystallinity and a change in the basic crystallographic characteristics.

УДК 621.384.633.5

## ПОЛУЧЕНИЕ ПУЧКОВ ИОНОВ МЕТАЛЛОВ НА ЭЦР-ИСТОЧНИКЕ DECRIS-3 МЕТОДАМИ НАГРЕВА ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ

<sup>1)</sup> Иванов И.А., <sup>1)</sup> Самбаев Е.К., <sup>1)</sup> Козин С.Г., <sup>1)</sup> Курахмедов А.Е., <sup>1)</sup> Мустафин Д.А.,  
<sup>1)</sup> Александренко В.В., <sup>2)</sup> Бондарченко А.Е., <sup>2)</sup> Логинов В.Н., <sup>2)</sup> Богомолов С.Л.

<sup>1)</sup> Астанинский филиал Института ядерной физики, Астана, Казахстан

<sup>2)</sup> Объединённый институт ядерных исследований, ЛЯР, Дубна, Россия

Для проведения ряда научно-технических задач в области радиационной физики твердого тела требуются ускоренные пучки ионов металлов, так, например, единственным методом для экспрессных оценок исследования радиационной повреждаемости, разрабатываемых конструкционных материалов ядерной техники является облучение ионами. Стандартные методы получения пучков ионов на ЭЦР-источниках из газовых смесей не могут полностью удовлетворить требования, предъявляемые экспериментом. Для увеличения спектра ускоряемых ионов на циклотроне ДЦ-60 проводятся работы по отработке методик нагрева твердых веществ для получения многозарядных пучков ионов металлов на ЭЦР-источнике DECRIS-3. Статья посвящена описанию методов получения пучков ионов металлов двумя способами: метод прямого введения вещества в плазму и метод нагрева тигля с рабочим веществом микропечью. В результате проведенной работы на циклотроне ДЦ-60 впервые были получены пучки ионов лития  ${}^6,7\text{Li}$ , магния  ${}^{24}\text{Mg}$ , фосфора  ${}^{31}\text{P}$  и кальция  ${}^{40}\text{Ca}$ . С использованием данных методов были получены пучки ионов лития  ${}^7\text{Li}^{1+}$  с расходом металла 1,1 мг/час и выведенным током пучка 500 мкА, магния  ${}^{24}\text{Mg}^{4+}$  с расходом вещества 2,1 мг/час и интенсивностью 81 мкА, фосфора с расходом вещества 1,7 мг/час при токе пучка  ${}^{31}\text{P}^{5+}$  60 мкА и кальция  ${}^{40}\text{Ca}^{5+}$  с расходом вещества 0,7 мг/час при токе пучка 140 мкА.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время к ускорителям заряженных частиц предъявляют особые требования по типам ионов, их энергии, интенсивности и другим различным параметрам пучка ускоренных ионов. Для успешного выполнения ряда научно-технических задач в области радиационной физики твердого тела, нанотехнологии и ядерной физики требуется проводить работы по получению новых типов ионов на ускорителях.

Одним из путей создания веществ с модифицированными свойствами является облучение существующих материалов различными типами ионов и флюенсами. Изменяя условия облучения можно придавать определенные свойства не только поверхностным слоям металлов и полупроводников, но и высокопрочным материалам, тем самым расширяя область дальнейшего применения облученного материала [1]. Необходимым этапом создания новых радиационно-стойких конструкционных материалов ядерных и термоядерных установок являются радиационные испытания. Единственным методом для экспрессных оценок исследования радиационной повреждаемости разрабатываемых конструкционных материалов ядерной техники является облучение ионами. Моделирование нейтронного (реакторного) облучения осуществляется облучением альфа-частицами, тяжелыми ионами инертных газов и ионами металлов. Наиболее точное моделирование нейтронного облучения – облучение сплавов ионами того же сорта, что сам материал. При этом ион моделирует первично-выбитый нейтроном атом облучаемого материала, создает радиационные дефекты и не изменяет элементного состава материала [2].

В качестве основных методов получения пучков ионов металлов на электронно-циклотронных резонансных источниках (ЭЦР-источниках) можно выделить два способа: нагрев рабочего вещества и испарение металлоорганических соединений. Метод испарения металлоорганических соединений MIVOC (Metal Ion from Volatile Compound) впервые был предложен группой под руководством Н. Koivisto [3]. MIVOC метод основан на использовании высокого давления пара металлических соединений при комнатной температуре, при котором металлическое соединение помещают в контейнер и подключают к ЭЦР-источнику, вводя в плазму пары вещества, где и происходит его ионизация. MIVOC метод, в основном, применяют для получения пучков ионов из веществ с высокой температурой плавления. Метод нагрева рабочего вещества, в основном, применяется для получения пучков ионов из веществ с низкой температурой плавления. Два данных метода дополняют друг друга, так как спектр получаемых ионов практически не пересекается. В данной статье описан метод получения ионов с использованием нагрева рабочего материала.

Принимая во внимание всю ширину спектра использования тяжелых ионов работы в направлении изучения и улучшения методик ионизации различного рода веществ являются одним из приоритетных и актуальных направлений в области ускорительной техники. Подводя итог, получение новых типов ионов на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60 [4] является приоритетным направлением для расширения спектра ускоряемых пучков ионов на циклотроне.

### МЕТОДЫ НАГРЕВА ВЕЩЕСТВА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПУЧКОВ ИОНОВ

Методы нагрева можно разделить на два способа: метод прямого нагрева вещества плазмой в ЭЦР-источнике и метод нагрева вещества с использованием микropечки. Эти два стандартных метода получения ионного пучка на ЭЦР-источниках для большинства металлов предполагают нагревание исходного вещества в целях повышения его давления пара до достаточного уровня. Данные методы характеризуются испарением твердых или расплавленных материалов в условиях высокого вакуума.

Начиная с 60-х годов 20-го века, когда ЭЦР-источники нашли своё первое применение в ускорительной технике и термоядерных испытаниях, ведутся работы по техническому усовершенствованию устройств и методик ионизации материалов [5]. Развитие методик ионизации материалов на ЭЦР-источниках значительно расширяет спектр получаемых ионов, используемых для решения научно-технических задач.

*Метод прямого введения* подробно изучался на источнике CAPRICE в Гренобле для широкого набора элементов, от алюминия до золота. Эксперименты показали эффективность данного метода для ионизации твердотельных элементов [6]. Сутью метода является преобразование агрегатного состояния рабочего вещества из твёрдого в газообразное за счёт высокой температуры плазмы вспомогательного газа. В камере источника предварительно разжигается плазма, состоящая из ионов вспомогательного газа He, Ar, O, для поддержания температуры испарения твёрдого вещества.

Основной проблемой метода прямого введения вещества в плазму является постоянная поддержка необходимой температуры для равномерного испарения рабочего вещества. При слишком высокой

температуре плазмы в области контейнера существует высокая вероятность испарения всего материала, который впоследствии осядет на холодных элементах ЭЦР-источника вдали от плазмы. В такой ситуации расход вещества будет нерациональным и дальнейшая работа источника не представляется возможной вследствие ухудшения стабильности экстракции ионов из источника. Если же температура окажется недостаточной для поддержания процесса равномерного испарения материала, то вещество будет кристаллизоваться и тем самым процесс ионизации вещества прекратится. Для решения данных проблем на ионном источнике циклотрона ДЦ-60 контейнер с веществом устанавливается на подвижном держателе внутри коаксиального волновода таким образом, что его положение может дистанционно регулироваться в диапазоне  $\pm 15$  мм относительно края коаксиального волновода. Таким образом, изменяя положение держателя производится регулирование температуры нагрева материала.

Для подачи рабочего вещества в ЭЦР-источник используется специальный шлюз подачи твердых веществ. На рисунке 1 представлена схема шлюза подачи твёрдых веществ используемого на ЭЦР-источнике типа DECRIS-3 [7] ускорительного комплекса ДЦ-60.

Данная конструкция универсальна, так как держатель рассчитан на установку контейнера, тигля, а также металлического стержня рабочего материала. Держатель испарителя представляет собой коаксиальную конструкцию, центральный проводник которой входит в электрический контакт 3 испарителя (рисунок 2, а). Механизм подачи обеспечивает прецизионную установку рабочего вещества в плазменную камеру с точностью не хуже 0,1 мм.

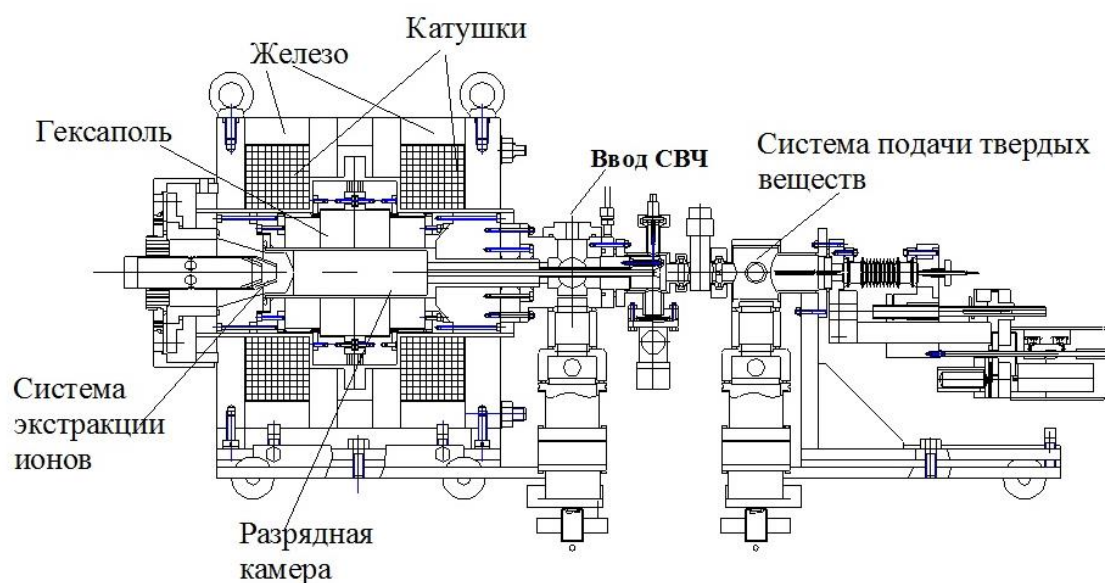


Рисунок 1. Система подачи твердых веществ в ЭЦР источник

Металлы с низкой температурой плавления под действием высоких температур, исходящих от плазмы, быстро расплавляются и стекают на стенки ионизационной камеры, делая процесс неконтролируемым. Поэтому в случае использования легкоплавких материалов в качестве рабочего вещества, таких как Li, Bi и др., материал помещается в специальный контейнер, изготовленный из тугоплавкого металла, чаще всего тантала. На выходе из контейнера устанавливается пористый барьер, предотвращающий выход расплавленного металла и не препятствующий выходу паров. Чаще всего контейнеры используются в совокупности с микропечами, которые позволяют дополнительно регулировать температуру.

Метод нагрева вещества с использованием микропечи хорошо работает в случае низкотемпературных материалов, например лития, магния, кальция и висмута. Устойчивая работа и эффективное использование печи обеспечиваются благодаря контролю её температуры. Печь размещается таким образом, чтобы атомы испарённого металла попадали в ЭЦР-плазму и ионизировались электронным ударом. При работе печи плазма в источнике ионов поддерживается с помощью введения опорного газа (гелия или кислорода). Количество металла в плазме регулируется изменением температуры печи. Для поддержания постоянной температуры используется пропорциональный терморегулятор. Стабильность выводимого пучка из источника при работе микропечи очень высока. За счёт этого достигаются оптимальные характеристики пучка ионов с минимальным расходом рабочего вещества.

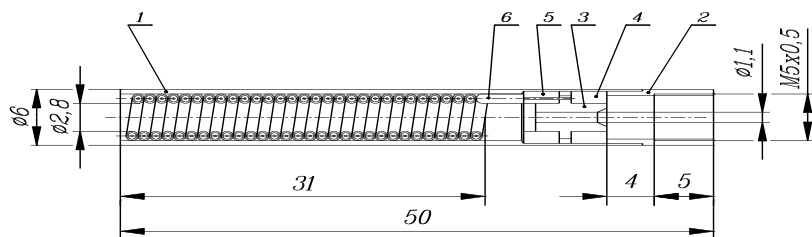
#### ПОЛУЧЕНИЕ ПУЧКОВ ИОНОВ МЕТАЛЛОВ

Работы по получению пучков ионов металлов произведены в Астанинском филиале Института ядерной физики на циклотроне ДЦ-60. Циклотрон ДЦ-60 предназначен для получения ионов от Li до Xe с соотношением  $A/Z$  в диапазоне  $6 \div 12$  и энергиями выведенных пучков от 0,4 до 1,75 МэВ/нуклон. Ускоритель оснащен ЭЦР-источником DECRI-3 с СВЧ-генератором частотой 14,5 ГГц. Основные па-

раметры источника: магнитное поле со стороны инжекции и экстракции пучка ионов 1,3 и 1,1 Тл соответственно, постоянное поле на стенках ЭЦР-камеры от гексаполя 1,0 Тл, длина камеры источника 20 см, диаметр камеры источника 6,4 см. Камера источника электрически изолирована до 25 кВ.

Тигель с рабочим веществом устанавливается в испаритель (рисунок 2), который установлен на держателе. Микропечь с находящимся внутри контейнером с рабочим веществом обеспечивает его испарение в ионизационную камеру. Максимальная температура в микропечи составляет 900 °С (рисунок 3). Стандартный танталовый тигель длиной 28 мм, внутренним диаметром 2 мм и внешним диаметром 2,8 мм, нагревается посредством специального коаксиального кабеля с внутренним никромовым проводником с минеральной изоляцией, который размещен в оболочке из нержавеющей стали.

В некоторых случаях, для увеличения времени работы источника используется тигель с увеличенным объемом. На рисунках 4а, 4б представлены изображения стандартного тигля и тигля увеличенного объема, соответственно. В тигле с увеличенным объемом центральный контейнер содержит рабочее вещество, внутренний диаметр контейнера составляет 6 мм, внешний – 7 мм, длина – 20 мм. С одной стороны контейнер соединен со стержнем, который нагревается испарителем; стержень имеет те же размеры, что и стандартный тигель. Пары металла поступают в разрядную камеру через сопло длиной 10 мм и внутренним диаметром 1 мм. Внутри сопла устанавливается скрученная танталовая проволока для предотвращения вытекания расплавленного вещества в разрядную камеру. Сопло и контейнер, в основном, нагреваются микроволнами с небольшим вкладом плазмы. Температура контейнера контролируется изменением его положения в камере источника. Мощность нагрева контейнера со стороны испарителя является дополнительной регулировкой для настройки скорости испарения материала.



1, 2 – корпус, 3 – электрический контакт, 4, 5 – керамические изоляторы, 6 – нагреватель

а)



б)

Рисунок 2. Конструкция (а) и внешний вид испарителя (б)

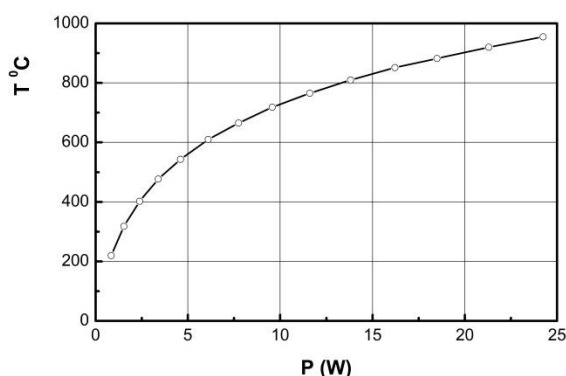


Рисунок 3. Зависимость температуры испарителя от мощности нагрева



а)



б)

Рисунок 4. Стандартный тигель (а) и тигель увеличенного объема (б)

На рисунке 5 представлен спектр ионов лития на ЭЦР-источнике, получаемый методом прямого введения в плазму контейнера с литием. На рисунке 6 представлен полученный спектр ионов лития в источнике с использованием нагрева тигля. Рабочая температура нагрева тигля составляла 200 °С. Расход металла при получении ионов лития с использованием контейнера и тигля составил 0,7 и 1,1 мг/час с выведенным током пучка ионов  ${}^7\text{Li}^{1+}$  200 и 500 мкА соответственно.

Ток пучка ионов магния  ${}^{24}\text{Mg}^{4+}$ , получаемый с использование контейнера составил 81 мкА, с расходом вещества 2,1 мг/час. Полученный спектр ионов магния представлен на рисунке 7.

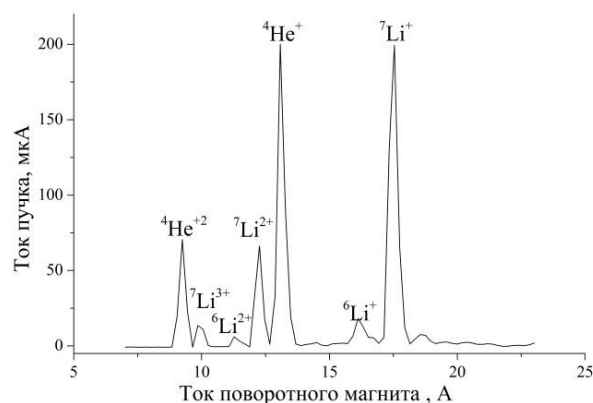


Рисунок 5. Спектр ионов лития, полученный с использованием контейнера

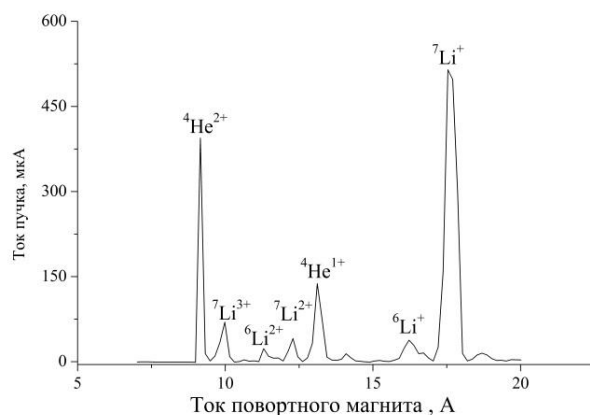


Рисунок 6. Спектр ионов лития, полученный с использованием тигля

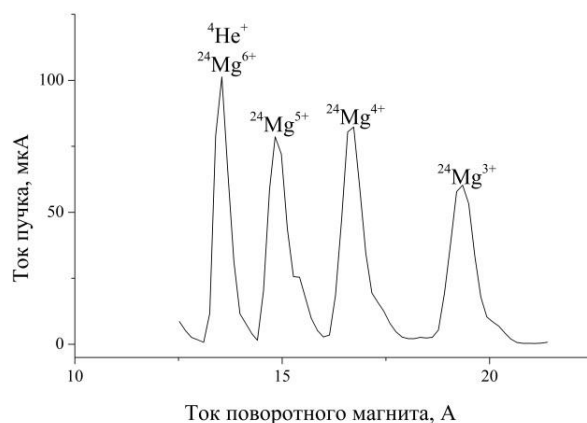


Рисунок 7. Спектр ионов магния, полученный с использованием контейнера

Получение ионов кальция проводилось с тигля, нагрев микроречи составил 720 °С. Настройка режима работы ЭЦР-источника оптимизировалась для получения ионов кальция  ${}^{40}\text{Ca}^{5+}$  с ионным током 140 мкА и  ${}^{40}\text{Ca}^{7+}$  с током 75 мкА, расход рабочего вещества составил 0,7 мг/час. Полученный спектр ионов приведен на рисунке 8.

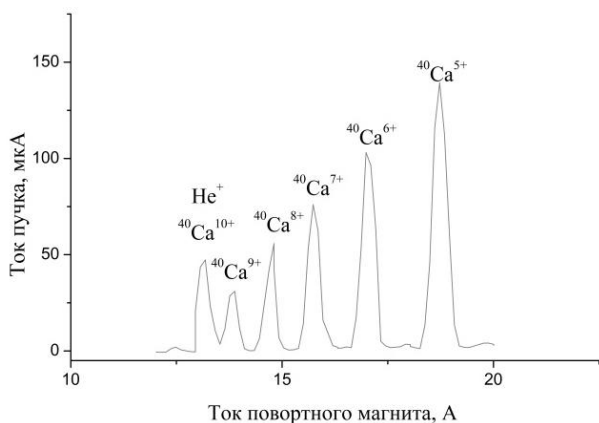


Рисунок 8. Спектр ионов кальция, полученный с использованием тигля

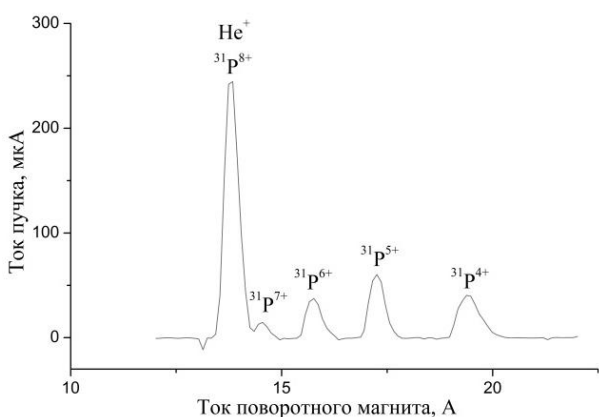


Рисунок 9. Спектр ионов фосфора, полученный с использованием тигля

Пучок ионов фосфора получали с использованием тигля. Полученный спектр ионов фосфора представлен на рисунке 9. Температура нагрева микропечи составила 100 °С. Расход фосфора составил 1,7 мг/час при токе пучка ионов фосфора  $^{31}\text{P}^{5+}$  60 мкА. В качестве рабочего вещества использовался красный фосфор.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие методик получения пучков ионов на ЭЦР-источниках из твердотельных веществ значительно расширяет возможности электрофизических установок. Основной целью данной работы являлась отработка методик получения пучков ионов металлов из твердых веществ на циклотроне ДЦ-60. В результате проведенной работы, на циклотроне ДЦ-60 впервые были получены пучки ионов лития  $^6,7\text{Li}$ , магния  $^{24}\text{Mg}$ , фосфора  $^{31}\text{P}$  и кальция  $^{40}\text{Ca}$ .

Данная работа выполнена в рамках проекта ИРН №АР05133476 «Сравнительные исследования тонкой структуры области повреждения металлов и сплавов, облученных ионами металлов и инертных газов» финансируемого МОН РК.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. I.P. Jain, Garima Agarwal. Ion beam induced surface and interface engineering // Surface Science Reports. – 2011. – Vol. 66. – P. 77–172.
2. E.Getto, K.Sun, S.Taller, A.M.Monterrosa, Z.Jiao, G.S.Was. Methodology for determining void swelling at very high damage under ion irradiation // Journal of Nuclear Materials. – 2016. –V. – 477. – P. 273–27.
3. Koivisto H. The MIVOC method for production of metal ion beams. – University of Jyväskylä, 1998. – P. 84.
4. M. Zdorovets, I.A. Ivanov, M. Koloberdin, S. Kozin, V. Alexandrenko, E. Sambaev, A. Kurakhmedov, A. Ryskulov. Accelerator complex based on DC-60 cyclotron // Material of XXIV Russian particle accelerator conference RUPAC 2014 (Obninsk, Russia, 6-10 October 2014). – P. 287–289.
5. Браун Я. и др. Физика и технология источников ионов / пер. с англ.: под ред. Машковой Е.С. – М.: Издательство Мир, 1997. – 495 с.
6. G. Melin, D. Hitz, F. Bourg, M. Delaunay, A. Girard, H. Khodja, P. Ludwig // The CAPRICE ECR source of multicharged ions new results and new prototype. Epac 96: Proceedings of the Fifth European Particle Accelerator Conference. – V3. – 1996. – P. 2704–2706.
7. S.L. Bogomolov, A.A. Efremov, V.B. Kutner, A.N. Lebedev, V.N. Loginov, N. Yu. Yazvitsky. Operation and Resent Development of ECR Ion Sources at the FLNR (JINR) Cyclotrons // Cyclotrons'98: Material of 15<sup>th</sup> International Conference on Cyclotron and their Applications. – Caen, France. – 1998. – P.405–408.

## МЕТАЛДАР ИОНДАРЫНЫҢ ШОҒЫРЫН DECRIS-3 ЭЦР-КӨЗІНДЕ ҚАТТЫ ЗАТТАРДЫ ҚЫЗДЫРУ ӘДІСІМЕН АЛУ

<sup>1)</sup> И.А. Иванов, <sup>1)</sup> Е.К. Самбаев, <sup>1)</sup> С.Г. Козин, <sup>1)</sup> А.Е. Курахмедов, <sup>1)</sup> Д.А. Мустафин,  
<sup>1)</sup> В.В. Александренко, <sup>2)</sup> А.Е. Бондарченко, <sup>2)</sup> В.Н. Логинов, <sup>2)</sup> С.Л. Богомолов

<sup>1)</sup> *Ядролық физика институтының Астаналық филиалы, Астана, Қазақстан*

<sup>2)</sup> *Біріккен ядролық зерттеулер институты, ЯРЗ, Дубна, Ресей*

Қатты денелер радиациялық физикасы саласында бірқатар ғылыми-техникалық мәселелерді шешу үшін металдар иондарының үдетілген шоғыры қажет, мысалға, иондармен сәулелендіру – ядролық техникалардың құрылымдық материалдарын әзірлеу кезіндегі радиациялық зақымдануды зерттеуде экспресс бағалаудың жалғыз әдісі болып табылады. Газ қоспаларынан ЭЦР-көзінде иондардың шоғырын алудың стандартты әдістері тәжірибеде қойылған талаптарды толығымен қанағаттандыра алмайды. ДЦ-60 циклотронында үдетілітін иондардың спектрін ұлғайту үшін DECRIS-3 ЭЦР-көзінде көп зарядталған металдар иондарының шоғырын алу мақсатымен қатты заттарды қыздыру әдісін әзірлеу бойынша жұмыстар жүргізілуде. Мақалада металдар иондарының шоғырын алудың екі әдісі сипатталған: заттардың плазмаға тікелей енгізу әдісі және микро пешпен жұмыс істейтін зат салынған тигельді қыздыру әдісі. Жүргізілген жұмыстардың нәтижесінде ДЦ-60 циклотронында алғаш рет  ${}^6,7\text{Li}$  литий,  ${}^{24}\text{Mg}$  магний,  ${}^{31}\text{P}$  фосфор және  ${}^{40}\text{Ca}$  кальций иондарының шоғыры алынды. Осы әдістерді пайдалана отырып, металл шығыны 1,1 мг/сағ, шоғырдың шығу тогы 500 мкА  ${}^7\text{Li}^{1+}$  литий, зат шығыны 2,1 мг/сағ, қарқындылығы 81 мкА  ${}^{24}\text{Mg}^{4+}$  магний, шоғырдың тогы 60 мкА, зат шығыны 1,7 мг/сағ кезінде  ${}^{31}\text{P}^{5+}$  фосфор және шоғырдың тогы 140 мкА, зат шығыны 0,7 мг/сағ кезінде  ${}^{40}\text{Ca}^{5+}$  кальций иондарының шоғыры алынды.

## METAL ION BEAMS PRODUCTION AT ECR-SOURCE “DECRIS-3” WITH SOLID STATES HEATING TECHNIQUE

<sup>1)</sup> I.A. Ivanov, <sup>1)</sup> Y.K. Sambayev, <sup>1)</sup> S.G. Kozin, <sup>1)</sup> A.E. Kurakhmedov, <sup>1)</sup> D.A. Mustafin,  
<sup>1)</sup> V.V. Alexandrenko, <sup>2)</sup> A.E. Bondarchenko, <sup>2)</sup> V.N. Loginov, <sup>2)</sup> S.L. Bogomolov

<sup>1)</sup> *Astana branch of Institute of Nuclear Physics, Astana, Kazakhstan*

<sup>2)</sup> *Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

Accelerated beams of metal ions are required for a series of scientific and technical tasks in the field of radiation physics of a solid state, for example, the only method for rapid assessments of the radiation damage investigation, the developed structural materials of nuclear technology is ion irradiation. The standard methods for production ion beams at ECR-sources from gas mixtures cannot fully meet the requirements of the experiment. To increase the spectrum of accelerated ions at the cyclotron DC-60 is working on developing methods of heating the solid substances to produce multiply charged ion beams of metals into an ECR ion source DECRIS-3. The article is dedicated to description of methods of production ion beams of metals in two ways: the direct injection of a substance into plasma and a method of heating the crucible with a working substance by micro-furnace. As a result of the work carried out on the DC-60 cyclotron, beams of lithium ions  ${}^6,7\text{Li}$ ,  ${}^{24}\text{Mg}$  magnesium,  ${}^{31}\text{P}$  phosphorus and  ${}^{40}\text{Ca}$  calcium were produced for the first time. Using these methods was produced beams of lithium ions  ${}^7\text{Li}^{1+}$  metal consumption of 1.1 mg/hour and derived a ion beam current of 500  $\mu\text{A}$ , magnesium  ${}^{24}\text{Mg}^{4+}$  with the consumption of the substance 2.1 mg/hour and intensity of 81  $\mu\text{A}$ , phosphorus consumption of substances 1.7 mg/hour at the beam current  ${}^{31}\text{P}^{5+}$  60  $\mu\text{A}$  and calcium  ${}^{40}\text{Ca}^{5+}$  with the consumption of a substance of 0.7 mg/hour when the beam current is 140  $\mu\text{A}$ .

УДК 621.039.546.8

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛЬНОЙ ТВС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ С МГНОВЕННОЙ БЛОКИРОВКОЙ ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В РЕАКТОРЕ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

<sup>1)</sup> Витюк В.А., <sup>2)</sup> Вурим А.Д., <sup>2)</sup> Котов В.М., <sup>2)</sup> Витюк Г.А., <sup>3)</sup> F. Serre, <sup>3)</sup> F. Payot, <sup>3)</sup> C. Suteau, <sup>3)</sup> L. Trotignon

<sup>1)</sup> РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, Казахстан

<sup>2)</sup> Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

<sup>3)</sup> Комиссариат по атомной энергии и альтернативным энергосистемам (СЕА), Кадараш, Франция

В работе исследованы возможности экспериментального изучения процессов разрушения модельной тепловыделяющей сборки (ТВС) реактора АСТРИД в условиях тяжелой аварии. Эксперименты с модельной ТВС могут быть проведены в исследовательском импульсном графитовом реакторе (ИГР) [1] в рамках совместной программы РГП НЯЦ РК и СЕА, получившей название САЙГА (SAIGA – Severe Accident In-Pile experiments for Generation IV reactor and Astrid project) [2].

Активная зона АСТРИД состоит из внутренней зоны с гетерогенными по высоте ТВС, в которых применен принцип разделения топлива высокого обогащения на две зоны (верхнюю и нижнюю) слоем топлива с низким содержанием урана-235, предназначенным для воспроизводства делящихся веществ, и внешней зоны с гомогенными ТВС [3]. В исследовании рассмотрены два варианта исполнения модельной тепловыделяющей сборки (ТВС) для реакторных испытаний, отличающиеся геометрией и составом установленных в них твэлов. Определены режимы испытаний модельной ТВС и проведен комплекс расчетов по их обоснованию.

### ВВЕДЕНИЕ

Использование в конструкции активной зоны гетерогенных по высоте ТВС, по замыслу разработчиков, вкупе с оптимизацией геометрии ТВС (уменьшение объемной доли натрия, малая высота ТВС и т.д.) позволит обеспечить отрицательный натриевый пустотный эффект реактивности реактор [4]. Размещение в центральной части зоны воспроизводства, которая в случае возникновения тяжелой аварии в быстром реакторе будет оставаться относительно холодной, может повлиять на процесс расплавления и перераспределения топлива в верхней и нижней зонах деления.

Исследование влияния центральной зоны воспроизводства на процесс развития тяжелой аварии является основной целью экспериментов, которые планируется провести в ИГР.

Важными условиями проведения исследований являются безопасность проведения работ на реакторе и возможно большее приближение условий нагружения испытываемых твэлов к условиям их работы в быстром реакторе.

Безопасность реактора с точки зрения теплового и механического воздействия со стороны объекта испытаний обеспечивается:

- применением массивных силовых корпусов, являющихся основным барьером на пути выхода расплава испытываемой ТВС в полость реактора;
- использованием ловушек, обеспечивающих локализацию, удержание и последующее охлаждение расплава вплоть до перехода в твердое состояние.

Выполнение этих требований существенно уменьшает объем пространства внутри экспериментального канала реактора. Поэтому разрабатываемые

модельные ТВС имеют меньшие размеры, чем оригинальные, содержат меньшее количество твэлов и сопряженных с ними элементов, но идентичны или очень близки по составу материалов к ним.

Приближение условий нагружения испытываемых твэлов условиям их работы в быстром реакторе будет реализовываться посредством обеспечения требуемых потоков нейтронов в рабочих режимах, их изменения в ходе имитации аварийной ситуации, идентичности основных объектов исследования – твэлов по геометрии и материальному составу, а также распределению нагружений в объеме твэла.

### ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕТЕРОГЕННОЙ АКТИВНОЙ ЗОНЫ И СЦЕНАРИЙ АВАРИИ

В активной зоне реактора [3] размещается 241 топливная сборка, содержащая 271 твэл в треугольной решетке. Диаметр твэла 9,7 мм, сердечника 8,45 мм. Толщина оболочки твэла из нержавеющей стали 0,5 мм. Высота столба топливных таблеток составляет 1,1 м. Твэл содержит нижнюю зону воспроизводства высотой 30 см, нижнюю зону деления высотой 25 см, верхнюю зону воспроизводства высотой 20 см и верхнюю зону деления высотой 35 см. Среднее энерговыделение в топливе верхней и нижней зоны деления при работе реактора на номинальной мощности составляет 90,6 и 74 Вт/г соответственно при содержании делящихся веществ в диоксиде ~ 15 % по массе. Расход натрия около 100 г/с на твэл в номинальном режиме при изменении температуры натрия от 400 К до 550 К.

Одним из сценариев запроектной аварии является прекращение расхода теплоносителя, сопровождаемое множественными отказами в системе аварийной защиты. На начальном этапе такого сценария тепловой поток от твэлов приводит к закипанию

натрия. Отрицательный натриевый пустотный эффект реактивности, заложенный в конструкции гетерогенной активной зоны, будет способствовать снижению мощности реактора в целом, а кипящий натрий обеспечивать определенный теплоотвод. В развитии такого сценария интенсивное кипение натрия будет нарушать условия теплоотвода от ТВЭЛОВ и приводить к их частичному осушению и последующему расплавлению.

#### Условия испытаний в ИГР

Технические характеристики ИГР позволяют проводить внутриреакторные исследования, направленные на получение информации о быстропротекающих процессах в элементах ядерных реакторов, что определяется реализуемой в нем максимальной плотностью потока тепловых нейтронов  $10^{17} \text{ н} \times \text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  при флюенсе до  $10^{16} \text{ н} \times \text{см}^{-2}$  за промежутки времени до долей секунды. Для установки экспериментальных изделий используется центральный экспериментальный канал реактора (ЦЭК) в котором установлена водоохлаждаемая ампула. Диаметр внутренней полости ампулы 228 мм, высота – около 386 см.

Внешнее оборудование реактора обеспечивает возможность подачи различных газовых компонент, воды, а в будущем и натрия к экспериментальным изделиям в ЦЭКе. Система управления потоком нейтронов реактора обеспечивает возможность реализации широкого набора диаграмм мощности в ядерном топливе экспериментальных изделий.

#### Конструкция модельной ТВС

Рассмотрены два варианта конструкции модельной ТВС (рисунок 1), приближенных к конфигурации и объемному соотношению материалов и теплоносителя в реакторе [3]. Отличиями от оригинальной ТВС в обоих случаях является количество и высота ТВЭЛОВ, определяемые возможностями ИГР. Как видно из рисунка 2 в модельном ТВэле по сравнению с реальным на 25 см уменьшена высота нижней зоны воспроизводства, что не оказывает влияния на исследуемые в ходе эксперимента процессы, однако позволяет существенно оптимизировать конструкцию экспериментального устройства.

В первом варианте в ТВэлах установлены таблетки типа БН-350 из диоксида урана с наружным диаметром 5,9 мм, которые традиционно используются в экспериментах. Во втором варианте установлены таблетки наружным диаметром 8,45 мм, как и в исследуемом реакторе. Полость под оболочкой ТВЭЛОВ заполнена инертным газом. Рассмотрены варианты заполнения гелием или аргоном.

Как и в оригинальном реакторе ТВэлы расположены в треугольной решетке с высотным размещением зон воспроизводства и деления. Взаимное размещение ТВЭЛОВ в решетке с заданным шагом, обеспечивается навивкой из стальной проволоки (рисунок 2). Связка из 37 ТВЭЛОВ устанавливается в шестигранный чехол, который, в свою очередь, окружен цилиндрической обечайкой для формирования газового тракта охлаждения.

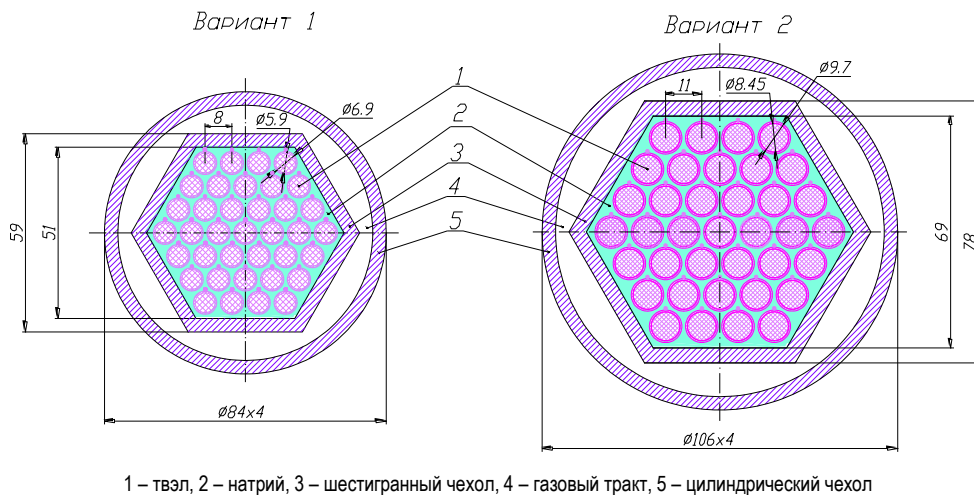


Рисунок 1. Схема горизонтального сечения модельных ТВС

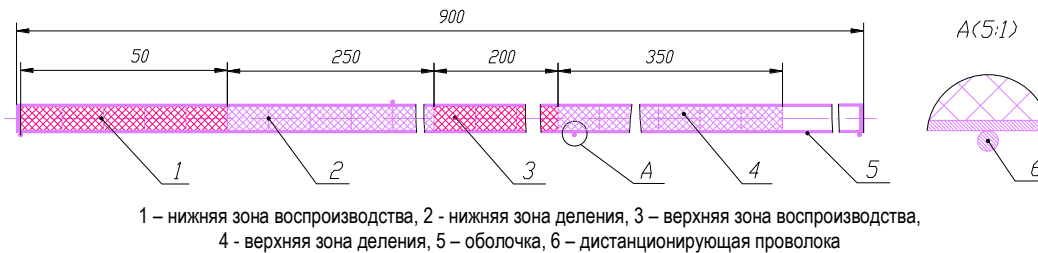


Рисунок 2. Схема ТВэла

В таблице 1 приведены характеристики модельных ТВС, полученные в ходе первичных нейтронно-физических и теплофизических расчетов. На этой стадии были определены содержания  $^{235}\text{U}$  в различных рядах ТВС и возможность использования аргона в полости под оболочкой твэлов. Применяется следующая нумерация рядов твэлов: 1 ряд – центральный твэл и шесть твэлов внутреннего ряда; 2 ряд – 12 твэлов промежуточного ряда; 3 ряд – 18 твэлов наружного ряда.

Таблица 1. Характеристики модельных ТВС

| Параметр                                               | Вариант 1     |       |       | Вариант 2 |       |       |
|--------------------------------------------------------|---------------|-------|-------|-----------|-------|-------|
|                                                        | 1 ряд         | 2 ряд | 3 ряд | 1 ряд     | 2 ряд | 3 ряд |
| Топливо                                                | диоксид урана |       |       |           |       |       |
| Обогащение по $^{235}\text{U}$ в зонах деления, %      | 17            | 12,7  | 8,6   | 17        | 11,7  | 7,1   |
| Содержание $^{235}\text{U}$ в зонах воспроизводства, % | 0,27          |       |       |           |       |       |
| Диаметр топливной таблетки, мм                         | 5,9           |       |       | 8,45      |       |       |
| Масса топлива, кг                                      | 8,6           |       |       | 17,6      |       |       |
| Диаметр оболочек твэлов, мм                            | 6,9×0,4       |       |       | 9,7×0,5   |       |       |
| Газовая среда внутри твэлов                            | аргон         |       |       | гелий     |       |       |

Необходимость профилирования содержания  $^{235}\text{U}$  в рядах вызвана тепловым спектром нейтронов реактора ИГР. В ТВС первого типа возможно использование аргона под оболочкой твэлов. Представленные содержания  $^{235}\text{U}$  в твэлах различных рядов обеспечивают неравномерность энерговыделения между рядами не более 2,5 %. Еще одной особенностью теплового спектра ИГР в этих экспериментах является неравномерность энерговыделения внутри твэла. Для твэлов меньшего диаметра различие энерговыделения между периферией и центром составила 11 %, а для твэлов большего диаметра – 12 %.

#### РЕЖИМЫ ИСПЫТАНИЙ

Исследуется авария с прекращением расхода теплоносителя. Экспериментальное устройство помещается в центральный экспериментальный канал и обеспечивается контуром циркуляции натрия между ТВС и внешней средой, средствами электрического подогрева этого контура.

На первом этапе проводится электрический разогрев до 673 К модельной ТВС и натрия в контуре циркуляции. После разогрева включается насос петлевого натриевого контура.

На втором этапе реактор ИГР выводится на уровень мощности, при котором энерговыделение в ТВС соответствует номинальному для реактора [3]. За счет ядерного нагрева твэлов достигается стационарный режим теплообмена в ТВС. При этом перепад температуры натрия между входом и выходом ТВС составляет 150 К.

На третьем этапе моделируется аварийный режим путем прекращения циркуляции натрия и со-

хранения прежней интенсивности ядерного нагрева твэлов. В ходе этого этапа происходит плавление определенной части топлива, желательно верхней зоны деления, и перемещение расплава вниз.

На четвертом этапе проводится останов реактора, включается подача азота для охлаждения шестигранного чехла. Длительность охлаждения определяется температурой шестигранного чехла.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ТВС В ИГР

Задача определения размещения ТВС по высоте в ИГР связана с требованием соответствия энерговыделения в верхней зоне деления ТВС уровню 90,6 Вт/г и в нижней – 74 Вт/г. На рисунке 3 представлено распределение мощности по высоте ТВС обоих типов, полученное в ходе нейтронно-физических расчетов на базе модели ИГР [5] в программном комплексе MCNP [6]. Оптимальное смещение центра ТВС относительно центра активной зоны ИГР составило 30,5 см вниз. Однако прорисовки размещения элементов экспериментального изделия показали невозможность размещения ловушки расплава требуемого объема для варианта с твэлами большего размера.

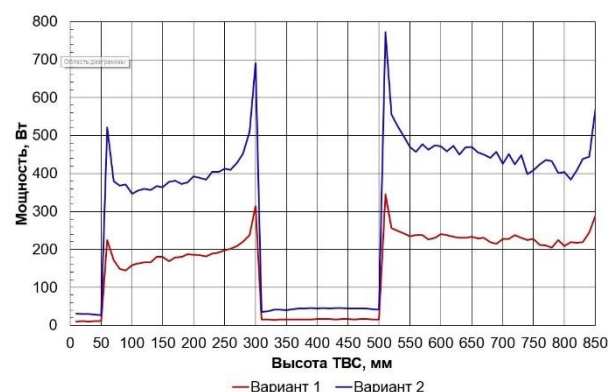


Рисунок 3. Распределение мощности по высоте ТВС

Установка ловушки расплава нужного размера в экспериментальном устройстве в данном случае возможна только при перемещении ТВС вверх на 14 см. Задача обеспечения требуемого распределения энерговыделения в зонах деления ТВС была решена с помощью введения поглотителя нейтронов вокруг нижней зоны в виде слоя из нержавеющей стали толщиной 6 мм. Характеристики вариантов представлены в таблице 2.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ВЫХОДА НА СТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ

Данные таблицы 2 показывают, что возможное время работы на номинальном режиме для первого варианта ТВС составит ~52,5 с, для второго – 36,4 с.

Результаты расчета времени достижения стационарного температурного режима работы ТВС при поддержании постоянного уровня мощности представлены на рисунке 4. Критерием достижения ста-

ционного режима является среднемассовая температура натрия на выходе из ТВС, равная 823 К. В первом варианте режим близкий к стационарному достигается через ~30 с от начала работы ИГР на постоянном уровне мощности, во втором варианте – через ~35 с при выходе на конечную температуру с отклонением в 1–2 К.

Таблица 2. Положение ТВС в ЦЭК и параметры энерговыделения

| Параметр                                                   | Вариант 1 | Вариант 2 |
|------------------------------------------------------------|-----------|-----------|
| Положение центра ТВС относительно центра активной зоны, см | –30,5     | –16,5     |
| Мощность ТВС, кВт                                          | 522       | 1084      |
| Мощность реактора, МВт                                     | 99        | 143       |
| Интеграл мощности реактора, МВт·с                          | 5200      |           |
| Среднее энерговыделение в верхней зоне деления, Вт/г       | 90,4      | 90,6      |
| Среднее энерговыделение в нижней зоне деления, Вт/г        | 74,2      | 74,4      |
| Расход натрия на номинальном режиме, г/с                   | 2740      | 5700      |

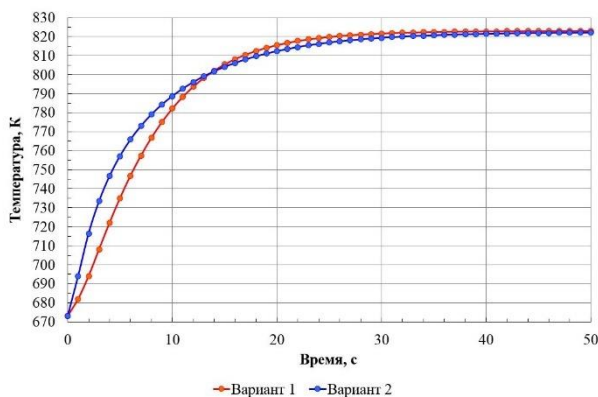


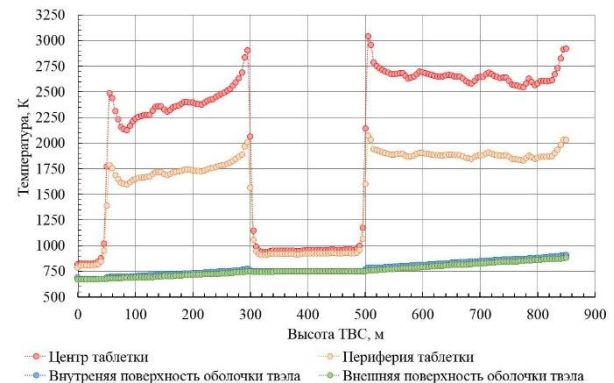
Рисунок 4. Температура натрия на выходе ТВС при работе на постоянной мощности

Расчет был выполнен в программном комплексе ANSYS [7] с использованием трехмерных расчетных моделей, подробно описывающих геометрию и материальный состав ТВС. Подтверждена заданная разница температуры натрия на входе и выходе ТВС на стационарном режиме.

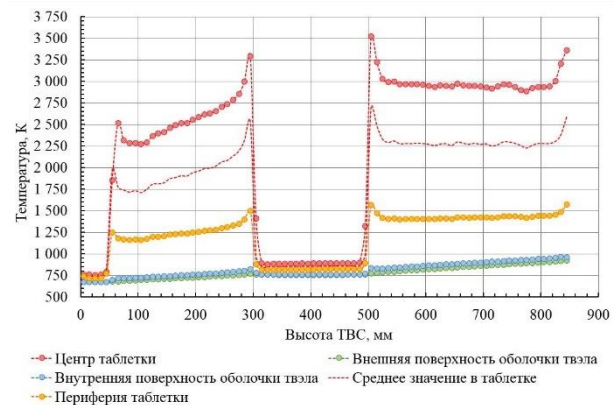
#### ПОЛЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТВС НА СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

Проведены расчеты распределения температуры по высоте элементов ТВС на стационарном режиме. Результаты расчетов для твэлов с выявленной максимальной температурой представлены на рисунке 5. Здесь проявилось влияние и особенностей теплообмена в различных областях ТВС. Видно, что максимальная температура в центре таблеток обоих вариантов, превышает температуру плавления диоксида урана ( $2920 \pm 100$  К) [8]. Превышение наблюдается на верхней границе зон деления и нижней границе

верхней зоны деления. Во втором варианте температура в центре топливных таблеток верхней зоны деления близка к температуре плавления.



а) вариант 1



б) вариант 2

Рисунок 5. Распределения температуры по высоте ТВС

Исследовано влияние состава газа-наполнителя пространства под оболочкой твэла на температурное поле в ТВС обоих вариантов. Было показано, что для первого варианта приемлемым является использование аргона. Для второго варианта аргон существенно ухудшает температурный режим по сравнению с гелием.

#### ОЦЕНКА ДЛИТЕЛЬНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Время проведения эксперимента включает время на предварительный разогрев экспериментального устройства и время работы реактора. Определяющей с точки зрения возможности реализации является реакторная часть эксперимента. Она складывается из двух основных частей – времени выхода на стационарный температурный режим при постоянном уровне мощности и времени работы на этом уровне мощности при отключенном расходе натрия через ТВС.

Общее время работы на постоянной мощности по данным таблицы 2 составляет для первого варианта 52,5 секунды, для второго варианта 36,4 секунды. Время, необходимое для полного расплавления ТВС, образования бассейна расплава и разрушения

шестигранного чехла при прекращении расхода натрия и продолжающимся энерговыделением в топливе, по данным [9], составляет ~21 с. В первом варианте ТВС располагаемое время на реализацию третьего этапа эксперимента с учетом времени выхода на стационарный режим составит 22,5 секунды, во втором варианте – 1,4 секунды. То есть запас времени для реализации третьего этапа эксперимента в случае второго варианта ТВС недостаточен для расплавления шестигранного чехла. Казалось бы, что исследования второго варианта невозможны.

Необходимо отметить, что для всестороннего изучения процесса разрушения топлива целесообразно провести несколько экспериментов, отличающихся долями расплава в общей массе ТВС. Возможно проведение исследования второго варианта при сокращении времени работы ТВС на постоянной мощности с расходом теплоносителя. В этом случае будет наблюдаться недогрев твэлов до уровня стационарного режима. На рисунке 6 видно, что в случае сокращения времени выхода на условно стационарный режим ТВС второго варианта с 35 с до 25 с температура топлива уменьшится не более, чем на 50 К (рисунок 6) при занижении температуры натрия на выходе ТВС на 5 К (рисунок 4). Недостаток энергии, которую необходимо сообщить топливу для догрева до температуры плавления и расплавления примерно соответствует энергии, отвод которой от твэла прекращается с отключением расхода натрия.

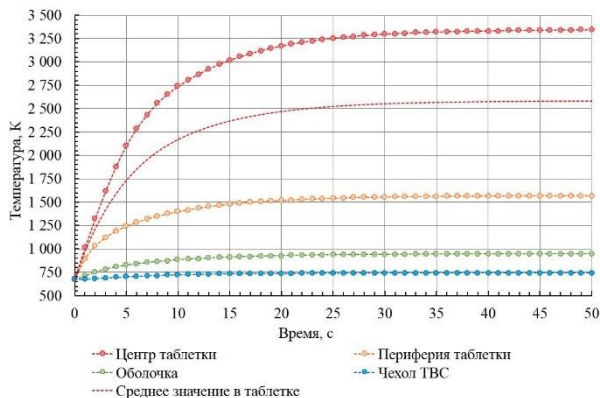


Рисунок 6. Динамика изменения температуры ТВС второго варианта в режиме выхода на стационарный режим

Результаты оценок показывают, что в условиях прекращения расхода натрия время, необходимое для полного расплавления ТВС второго варианта,

составит 7,5 с, при этом на догрев топлива до температуры плавления потребуется около 3,5 с. Таким образом, в пределах общего времени работы ТВС на стационарной мощности 36,4 с возможно реализовать эксперименты как с частичным, так и с полным расплавлением ТВС.

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Следует выделить особенности работы исследованных вариантов ТВС в ИГР.

Во-первых, превышение рабочей температуры в части твэлов на верхней границе нижней зоны деления будет искажать условия эксперимента – снижать запас по возможности плавления в нижней зоне, задаваемый концепцией быстрого реактора [1]. Для устранения этого эффекта следует ввести коррекцию содержания  $^{235}\text{U}$  в этой части топливного столба.

Во-вторых, превышение рабочей температуры над температурой плавления топлива в части твэлов верхней зоны деления, безусловно, недопустимо для самого реактора [1], но при постановке рассматриваемого эксперимента его можно считать приемлемым, так как назначением верхней зоны является образование расплава. Превышение температуры в рассматриваемых участках будет достигаться в относительно небольшом объеме и только к концу выхода на стационарный режим.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенной работы подтверждают возможность исследования в ИГР тяжелой аварии с расплавлением активной зоны реактора на быстрых нейтронах АСТРИД. Проработаны два варианта модельных ТВС, отличающиеся диаметром твэлов, для реакторных экспериментов. Приближение характеристик модельных ТВС в ИГР к ТВС быстрого реактора достигается за счет радиального профилирования содержания  $^{235}\text{U}$  в твэлах. Определено время достижения равновесного температурного режима в ТВС при ее работе на постоянном уровне мощности, соответствующем нагружению в быстром реакторе. Показаны возможности реализации плавления топлива в ТВС обоих типов.

Использование двух типов ТВС, а также реализация экспериментов с различной степенью расплавления топлива обеспечивает возможность получения набора экспериментальной информации, позволяющего выделить влияние различных факторов на характеристики разрушения ТВС с разделенными зонами деления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Курчатov, И.В. Импульсный графитовый реактор ИГР / И.В. Курчатov, С.М. Фейнберг, Н.А. Доллежал // Атомная энергия. – 1964. – Т. 17, № 6. – С. 463-474.
2. Serre, F., et al., "R&D and Experimental Programs to support the ASTRID Core Assessment in Severe Accidents Conditions". – Proceedings of International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP), 2016, San Francisco (CA, USA), April 17–20, 2016, Paper 16394.
3. The ASTRID technological demonstrator. 4th-Generation sodium-cooled fast reactors. – Tome 3, December, 2012., 96 pages.

4. P. SCIORA, et al., "Low void effect core design applied on 2400 MWth SFR reactor" – Proceedings of ICAPP 2011, Nice, France, May 2-5, 2011.
5. Kotov V.M., Irkimbekov R.A., Kurpesheva A.M., Bench-Mark model of the IGR reactor. - The collection of theses of 8<sup>th</sup> International conference «Nuclear and radiation physics», Almaty, 20-23th. September, 2011., p. 37.
6. MCNP 5: A General Monte Carlo N – Particle Transport Code, Version 5, 2003.
7. ANSYS, Inc. Products Release 14.0, 2014.
8. Чиркин, В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / В.С. Чиркин; М.: Атомиздат, 1968. – 121–128, 291–294, 237–239 с.
9. Bassi A., Payot F., Suteau C. and Serre F. SAIGA feasibility studies: Study of the bundle degradation for the TIB scenario. Materials on NNC / CEA technical meeting – 2015 Sept 10.

## **ШАПШАҢ НЕЙТРОНДЫ РЕАКТОРЛАРДА ЖЫЛУТАСЫМАЛДАҒЫШ АҒЫНЫН ДЕРЕУ БЛОКТАЙ ОТЫРЫП АПАТТЫҚ ЖАҒДАЙДА ЗЕРТТЕУГЕ АРНАЛҒАН МІДЕЛДІ ЖБЖ ЖЕТІЛДІРУ**

<sup>1)</sup> В.А. Витюк, <sup>2)</sup> А.Д. Вурим, <sup>2)</sup> В.М. Котов, <sup>2)</sup> Г.А. Витюк, <sup>3)</sup> F. Serre, <sup>3)</sup> F. Payot, <sup>3)</sup> C. Suteau, <sup>3)</sup> L. Trotignon

<sup>1)</sup> «Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығы» РМК, Курчатов, Қазақстан

<sup>2)</sup> ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

<sup>3)</sup> Атом энергиясы және баламалы энергия көздері жөніндегі комиссариат (CEA), Кадараш, Франция

Жұмыста АСТРИД реакторының моделді жылу бөлу жинағының (ТВС) бұзылу үдірісін ауыр апаттар жағдайында экспериментті зерттеп білу мүмкіндігі зерттелді. Моделді ТВС-пен эксперименттер САЙГА (SAIGA – Severe Accident In-Pile experiments for Generation IV reactor and Astrid project) [2] деп аталатын ҚР ҰЯО РМК және CEA бірлескен бағдарлама аясында зерттеу импульстік графиттік реакторда (ИГР) жүргізілуі мүмкін [1].

АСТРИД белсенді аумағы ТВС биіктігі бойымен гетерогенді ішкі аумақтан тұрады, оларда жоғары байытылған отынның бөлінетін заттарды өндіруге және гомогенді ТВС сыртқы аумағына арналған уран-235 төмен құрамы бар отынның екі аумағына (үстіңгі және астыңғы) бөліну қағидасы қолданылды [3]. Зерттеулерде орнатылған твэлдердің геометриясымен және құрамымен ерекшеленетін реакторлық сынақтарға арналған моделді жылу бөлу жинағын орындаудың екі нұсқасы қарастырылды. Моделді ТВС-ті сынау режимдері анықталды және оларды негіздеуге есептемелер кешені жүргізілді.

## **DEVELOPMENT OF A MODEL FA FOR THE STUDY OF EMERGENCY SITUATION WITH AN IMMEDIATE BLOCKING OF THE COOLANT FLOW IN FAST REACTOR**

<sup>1)</sup> V.A. Vityuk, <sup>2)</sup> A.D. Vurim, <sup>2)</sup> V.M. Kotov, <sup>2)</sup> G.A. Vityuk, <sup>3)</sup> F. Serre, <sup>3)</sup> F. Payot, <sup>3)</sup> C. Suteau, <sup>3)</sup> L. Trotignon

<sup>1)</sup> RSE "National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan", Kurchatov, Kazakhstan

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

<sup>3)</sup> Commissariat of atomic energy and alternative energy sources (CEA), Cadarache, France

Possibilities of experimental study of the model fuel assembly (FA) destruction of ASTRID reactor in a severe accident were studied in this paper. Experiments with model FA can be carried out in a research impulse graphite reactor (IGR) [1] in the framework of joint program between RSE NNC RK and CEA, called SAIGA (SAIGA – Severe Accident In-Pile experiments for Generation IV reactor and Astrid project) [2].

ASTRID reactor core consists of an inner zone with heterogeneous FA in height, in which the principle of separation of high enrichment fuel into two zones (upper and lower) is applied by fuel layer with a low uranium-235 content, intended for the reproduction of fission substances, and an external zone with homogeneous FA [3]. The study considers two versions of the model FA for reactor tests, which differ in the geometry and composition of the fuel elements installed in them. Test modes of model FA are determined and complex calculations on their justification is conducted.

УДК 621.9.048

## СТРУКТУРНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ В СТАЛИ 20ГЛ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКИ

Рахадиллов Б.К., Байжан Д.Р., Сагдолдина Ж.Б., Кенесбеков А.Б.

*Восточно-Казахстанский государственный университет им. С. Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан*

Настоящая работа посвящена исследованию влияния процесса электролитно-плазменной поверхностной закалки на структуру и свойства стали марки 20ГЛ, которая используется для подготовки изделий железнодорожного транспорта (балка надрессорная и рама боковая). Процесс электролитно-плазменной поверхностной закалки проведен в электролите из водного раствора 20 % карбоната натрия в следующем режиме: подаваемое напряжение между анодом и образцом при нагреве до температуры закалки – 320 В, время нагрева электролитно-плазменным воздействием – 2 с и 3 с, при этом образцы нагревались до ~850 °С. Результаты исследования структуры образца показали линии  $\alpha$ -фазы и слабые рефлексы цементита и оксида. Толщина модифицированного слоя составляла 500–550 мкм. Результаты исследования механических свойств образца показали небольшое увеличение микротвердости и значительное увеличение износостойкости образца стали 20ГЛ после обработки.

### ВВЕДЕНИЕ

Электролитно-плазменная поверхностная закалка (ЭППЗ) основана на использовании высоко температурного воздействия искровых разрядов, происходящих вблизи поверхности обрабатываемого изделия, погруженного в ванну с электролитом. При пропускании электрического тока через электролит на поверхности катода, которым служит обрабатываемое изделие, образуется тонкий слой плазмы, где происходит преобразование электрической энергии в тепло [1–4]. При этом закалка производится путем периодического нагрева и охлаждения поверхности обрабатываемого изделия за счет изменения электрического потенциала в слое плазмы, создаваемом между электродами (катод – погруженный в электролит образец, анод – металлический корпус рабочей ванны) [5]. Основными достоинствами ЭППЗ являются: эффективность поверхностного упрочнения, значительная глубина упрочненных слоев достигает до 10 мм [6], экологическая безопасность, связанная с возможностью реализации процесса без использования токсичных электролитов и соединений (нейтральные слабые водные растворы солей и кальцинированной соды), которые не требуют специальных очистных сооружений для их утилизации [7].

*Объект исследования:* структура и свойства стали 20ГЛ до и после электролитно-плазменной закалки поверхности (ЭППЗ).

*Цель работы:* исследование влияния процесса ЭППЗ на микроструктуру и механические свойства стали марки 20ГЛ.

*Актуальность проблемы:* исследованию влияния процесса ЭППЗ на структуру и свойства стали марки 20ГЛ, которая используется для подготовки изделий железнодорожного транспорта (балка надрессорная и рама боковая), выпускаемых на АО «Востокмашзавод», Казахстан, г. Усть-Каменогорск. В условиях высокого нагружения, при больших скоростях движения железнодорожных составов, а также

в холодных климатических районах требуется улучшение известных значений свойств, регламентируемых ГОСТ-32400\2013. В связи с этим изучение особенностей изменения структуры и механических свойств стали 20ГЛ после ЭППЗ представляет большой научный и практический интерес.

*Новизна:* предлагается создание ресурсосберегающей технологии электролитно-плазменной поверхностной закалки изделий железнодорожного транспорта (балка надрессорная и рама боковая), обеспечивающей повышения твердости, износостойкости и прочностных характеристик рабочей поверхности.

*Практическая ценность:* внедрение способа ЭППЗ, увеличивающего долговечность деталей (балка надрессорная и рама боковая), в машиностроительное производство приводит к снижению амортизационных затрат.

*Результат:* исследования механических свойств образца показали небольшое увеличение микротвердости, но значительное увеличение прочностных характеристик образца стали 20ГЛ после ЭППЗ.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы для исследования были вырезаны из изделий в виде параллелепипедов с размерами  $8 \times 20 \times 20$  мм<sup>3</sup>, подвергнутых термообработке в заводских условиях. Обрезку образцов проводили алмазным диском толщиной в 1 мм, который был погружен в охлаждающую жидкость. ЭППЗ образцов сталей выполняли на установке электролитно-плазменной обработки. Процесс ЭППЗ проводили в электролите из водного раствора 20 % карбоната натрия в следующем режиме: подаваемое напряжение между анодом и образцом при нагреве до температуры закалки 320 В, время нагрева электролитно-плазменным воздействием 2 и 3 секунды, при этом образцы нагревались до ~850 °С.

Поперечное сечение обработанного образца стали марки 20ГЛ было изучено на оптическом микроскопе «ММР-4». Перед исследованием образцы были отшлифованы и отполированы. Для выявления

границ зерен и частиц карбидных фаз было применено химическое травление шлифов в 4 % спиртовом растворе азотной кислоты (время травления 5–7 с).

Рентгенофазное исследование образцов проводили на дифрактометре X'PertPRO. Съемку дифрактограмм проводили с использованием  $\text{CuK}\alpha$ -излучения ( $\lambda=2,2897 \text{ \AA}$ ) при напряжении 40 кВ. Расшифровка дифрактограмм проводилась вручную с использованием стандартных методик и базы данных PDF-4, а количественный анализ выполнялся с помощью программы PowderCell.

Измерение микротвердости образцов сталей проводили на приборе PMT-3М при нагрузке на индентор  $P=1 \text{ Н}$  и времени выдержки при этой нагрузке 10 с по методу Виккерса. Трибологическое испытание на трение скольжения проводили на высокотемпературном трибометре ТНТ-S-BE-0000 с использованием стандартной методики «шар-диск». В качестве контртела использовали шарик диаметром 6 мм, из сертифицированного материала –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Испытания проводили при комнатной температуре и при нагрузке 1 Н с линейной скоростью 2 см/сек и радиусом кривизны износа 5 мм, путь трения составлял 31,4 м. Испытание образцов на абразивное изнашивание проводили на экспериментальной установке для испытаний на абразивное изнашивание при трении о не жестко закрепленные частицы абразива по схеме «вращающийся ролик – плоская поверхность». Для тестирования абразивного истирания на резиновом круге, поверхности образцов были отшлифованы и отполированы, так же они были очищены с помощью ацетона и высушены. Цилиндрический резиновый ролик, прижатый радиальной поверхностью к плоской поверхности исследуемого образца с усилием 22 Н, вращался с частотой  $1 \text{ с}^{-1}$ . Скорость поступления абразивных частиц между резиновым колесом и образцом, то есть в зону испытания составила 41–42 г/мин. В качестве абразивных частиц использовался электрокорунд зернистостью 200–250 мкм. Износостойкость испытуемого обработанного образца оценивалась путем сравнения его износа с износом эталонного образца (не обработанного образца). Износ замеряли весовым методом на

аналитических весах АДВ-200 с точностью до 0,0001 г. Образцы взвешивались каждую минуту и тестировались в течение трех минут, длина всего износа составляла 28,8 м. Перед взвешиванием образцы обдувались с помощью сжатого воздуха для удаления оставшихся частиц песка на пробах. Износостойкость испытуемого материала оценивали по убыли массы образцов за время испытания согласно ГОСТ-23.208-79.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 показана микроструктура поперечного сечения стали 20ГЛ после ЭППЗ. Толщина модифицированного слоя примерно составляет 500–550 мкм. Микроструктуру условно можно разделить на 3 зоны: 1 – зона интенсивных структурных превращений, закаленный слой; 2 – зона термического влияния; 3 – зона, имеющая структуру исходной матрицы. В переходной зоне представлена более мелкозернистая структура, характерная для зоны термического влияния, по сравнению с крупно зернистой структурой матрицы.

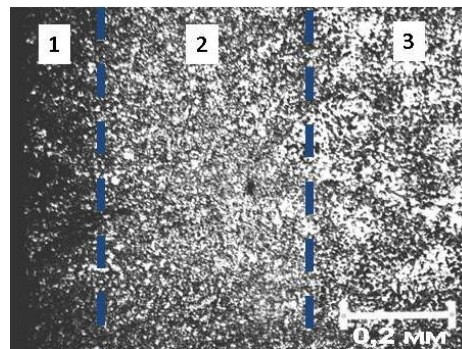


Рисунок 1. Микроструктура поперечного сечения сталей 20ГЛ после ЭППЗ с продолжительностью нагрева 2 с

На рисунке 2 представлены дифрактограммы исходной (после стандартной термической обработки) стали 20ГЛ до и после ЭППЗ. Рентгенофазный анализ показал, что на дифрактограммах присутствуют линии  $\alpha$ -фазы и слабые рефлексы цементита и оксида. Изменение относительной интенсивности линии (110) после ЭППЗ свидетельствует об изменении механизмов кристаллизации и размера кристаллов.

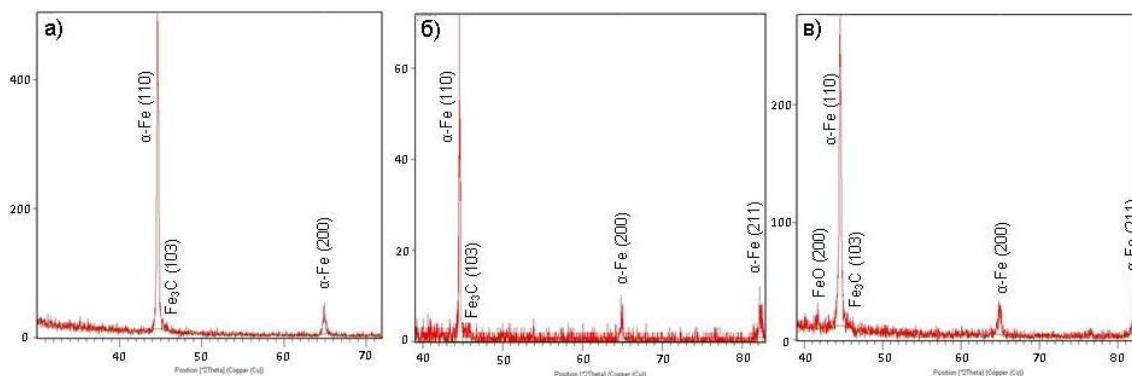


Рисунок 2. Дифрактограмма стали 20ГЛ до (а) и после ЭППЗ с продолжительностью нагрева 2 с (б) и 3 с (в)

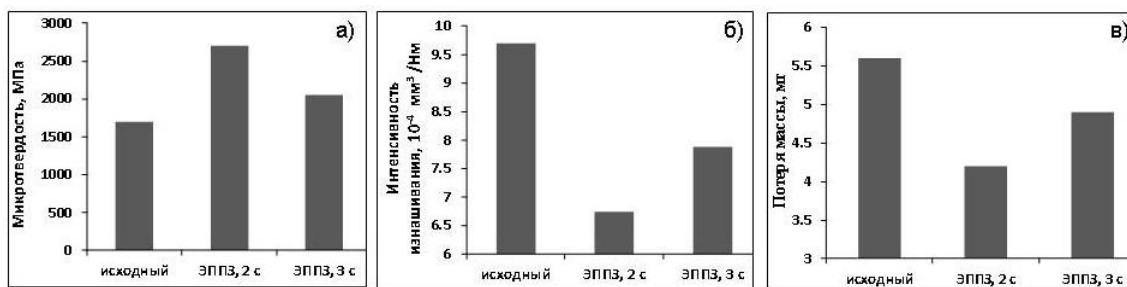


Рисунок 3. Результаты исследования механических свойств стали 20ГЛ: микротвердость (а); интенсивность изнашивания (б); абразивный износ (в)

Для выяснения влияния структурных превращений поверхности после ЭППЗ на механические свойства стали 20ГЛ были определены микротвердость и износостойкость образцов (рисунок 3). На рисунке 4, а приведена зависимость значений микротвердости от продолжительности воздействия ЭППЗ. Микротвердость образца после ЭППЗ увеличивается. Однако наблюдается некоторое различие в изменении твердости образцов, обработанных разное время нагрева. Значительный рост микротвердости образца после ЭППЗ в течение 2 с может быть связан с измельчением блоков внутри зерна аустенита.

На рисунке 3, б показана интенсивность изнашивания образцов до и после ЭППЗ. Видно, что обработанные образцы показывают значительное снижение интенсивности изнашивания по сравнению с исходным образцом, которые указывает на значительное повышение износостойкости стали. Результаты испытания образцов на абразивный износ охарактеризовали потерю массы образцов после испытания. Потеря массы упрочненных образцов меньше, чем неупрочненного образца, что указывает на повышение стойкости абразивному износу стали 20ГЛ после ЭППЗ.

Таким образом, результаты исследования механических свойств образца показали небольшое увеличение микротвердости, но значительное увеличение износостойкости образца после ЭППЗ.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлено, что после ЭППЗ микроструктура поперечного сечения сталей 20ГЛ состоит из 3 зон: 1 – зона интенсивных структурных превращений, закаленный слой; 2 – зона термического влияния; 3 – зона, имеющая структуру исходной матрицы. Толщина модифицированного слоя примерно составляет 500–550 мкм;

2. Рентгенофазный анализ показал, что на дифрактограммах присутствуют линии  $\alpha$ -фазы и слабые рефлексы цементита и оксида. Значительное снижение интенсивности линии (110)  $\alpha$ -фазы после ЭППЗ с продолжительностью нагрева 2 с может быть связано с измельчением блоков внутри зерна аустенита;

3. Результаты исследования механических свойств образца показали небольшое увеличение микротвердости, но значительное увеличение износостойкости образца стали 20ГЛ после ЭППЗ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рама боковая и балка надрессорная литые тележек железнодорожных грузовых вагонов ГОСТ 3240-2013 – 2014. – Введ. 2014-01-07. – М.: Изд-во Стандартиформ, 2014. – 50 с.:ил.
2. Ясногородский Я.З. Автоматический нагрев в электролите. – М.: Изд. Оборонгиз, 1947. – 24 с.
3. Дураджи В.Н., Парсаданян А.С., Нагрев металлов в электролитной плазме. – Кишинев: Изд. Штиинца, 1988. – 214 с.
4. Белкин П.Н. Электрохимико – термическая обработка металлов и сплавов. – М.: Изд. Мир, 2005. – 336 с.
5. Черненко В.И., Снежко Л.А., Папанова И.И., Литовченко К.И. Теория и технология анодных процессов при высоких напряжениях. – Киев: Изд. Наукова думка, 1995. – 196 с.
6. Тюрин Ю.Н., Погребняк А.Д. Особенности электролитно-плазменной закалки (ЭПЗ) // Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72. – №11. – С.119-120.
7. Tyurin Yu.N, Pogrebnyak A.D. Electric heating using a liquid electrode // Surf. and Coat. Tech. 2001. V. 142–144. P. 293– 299.

**20ГЛ БОЛАТЫНЫҢ ЭЛЕКТРОЛИТТИ-ПЛАЗМАЛЫҚ БЕТТІК  
ШЫНЫҚТЫРУДАН КЕЙІНГІ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ӨЗГЕРІСІ**

**Б.К. Рахадиллов, Д.Р. Байжан, Ж.Б. Сагдолдина, А.Б. Кенесбеков**

*С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан Мемлекеттік университеті, Өскемен, Қазақстан*

Бұл жұмыс теміржол көлігі өнімдерін (ресор астындағы валдарын және бүйірлік жақтауын) дайындау үшін пайдаланылатын 20ГЛ болаттың құрылымы мен қасиеттеріне электролит-плазмалық беттік шынықтандыру (ЭПБШ) процесінің әсерін зерттеуге арналған. ЭПБШ үдерісін электролитте 20 % натрий карбонатының су ерітіндісінде келесі режимде жүргізілді: шынықтыру температурасына дейін қыздыру кезінде үлгі және анод арасында берілетін кернеу – 320 В, электролитті-плазмалық әрекеттесумен қыздыру уақыты 2–3 секунд, бұл кезде үлгілер сәйкесінше ~850 °С дейін қызды. Үлгілердің құрылымын зерттеу нәтижесі α фаза мен цементит пен оксидтің әлсіз рефлекстері бар екенін көрсетті. Модификацияланған қабаттың қалыңдығы шамамен 500–550 мкм. 20ГЛ болат үлгісінің кейінге механикалық қасиеттерін зерттеу нәтижелері микроаттылықты аздап ұлғайғанын және қажалуға төзімділік қасиетінің айтарлықтай өсуі байқалды.

**STRUCTURAL TRANSFORMATION IN THE STEEL 20GL  
AFTER ELECTROLYTE PLASMA SURFACE HARDENING**

**B.K. Rakhadilov, D.R. Baizhan, Zh.B. Sagdoldina, A.B. Kenesbekov**

*S. Amanzholov East Kazakhstan State University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan*

The present work is devoted to the investigation of the effect of the electrolyte-plasma surface hardening process on the structure and properties of 20GL steel used for the preparation of railroad products (the supertor bar and the side frame). The electrolyte-plasma surface hardening process was carried out in an electrolyte from an aqueous solution of 20% sodium carbonate in the following mode: the applied voltage between the anode and the sample when heated to a quenching temperature of 320 V, the heating time by electrolytic-plasma exposure of 2 s and 3 s, ~ 850 °C. The results of a study of the structure of the sample showed the lines of the α phase and the weak reflexes of cementite and oxide. The thickness of the modified layer was 500–550 μm. The results of the study of the mechanical properties of the sample showed a slight increase in the microhardness, but a significant increase in wear resistance of the 20GL steel sample after treatment.

УДК 691.175.5/.8

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОЛИМЕРОВ

Рахадиллов Б.К., Буйткенов Д.Б., Акатан К.

*Восточно-Казахстанский государственный университет им. С. Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан*

Данная работа связана с исследованием влияния электронно-лучевой обработки физико-механические свойства полимерных материалов (PEI и PET). После электронно-лучевой обработки при режиме тока пучка 30 мА и энергии 1,2 кэВ микротвердость полимеров увеличился в 1,5 раза по сравнению с исходным состоянием. На образцах полимера PET наблюдается снижение интенсивности изнашивания до 30 %, а стойкость к абразивному износу полимера увеличился на 1,3 раза по сравнению с исходным образцом. Результаты проведенных исследований показали перспективность применения электронного облучения для повышения эксплуатационных характеристик полимерных материалов.

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной науки и техники немаловажно без применения полимерных материалов. В настоящее время нет ни одной отрасли народного хозяйства, где бы ни использовались пластические массы. Расширение областей применения полимерных материалов потребовало создания на его основе новых конструкционных материалов с заданным комплексом свойств, способных к переработке в изделия высокопроизводительными методами. Сложность в решении этой задачи обусловлена рядом недостатков, присущих самому полимеру, таких как низкая стойкость к действию высоких температур, узкий температурный интервал переработки, низкая ударопрочность и износостойкость [1, 2].

Полимерные изделия, помимо химической стойкости и сохранения свойств при низких температурах должны обладать и высокой износостойкостью. Таким образом, поиск дальнейших путей повышения износостойкости полимерных материалов является актуальной научно-технической проблемой.

Одним из способов формирования композиционных материалов на полимерных материалах, обладающих повышенными механическими и триботехническими характеристиками, является введение армирующих добавок в виде мелкодисперсного наполнителя. Существенный вклад в развитие исследований структуры и триботехнических свойств наполненных композитов на основе полимера внесли А.П. Краснов, И.С. Зу, Л. Йу и др. [3, 4]. В подавляющем большинстве случаев введение наночастиц приводило к существенному повышению износостойкости, при этом содержание наночастиц не превышало несколько десятых массовых процентов. Другим распространенным способом повышения механических и триботехнических свойств полимеров является их облучение пучками заряженных частиц.

При облучении пучками заряженных частиц в полимерах возникают промежуточные образования, обладающие высокой реакционной способностью – свободные радикалы, ионы, возбужденные молекулы. Они являются источниками дальнейших химических превращений, приводящим к изменениям хи-

мического строения, а, следовательно, и свойств полимеров. В частности, при действии излучений в полимерах образуются поперечные межмолекулярные и внутримолекулярные связи – протекают процессы разрыва связей в главной цепи и боковых группах, реакции прививки, окисления и др. происходит распад и образование винильных, виниленовых и винилиденных групп, а также изомеризация (в том числе цистрансизомеризация), циклизация [5, 6].

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала исследования была выбрана образцы PEI (полиэфиримид) и PET (полиэтилентерефталат) – универсальный многофункциональный полукристаллический полимер конструкционного и антифрикционного назначения.

В настоящей работе в качестве основных методов исследования были использованы: механические испытания образцов на микротвердость, износостойкость, исследование микроструктуры. Облучение образцов производилось на ускорителе электронов ЭЛВ-4. Режимы электронного облучения на ускорителе ЭЛВ-4 приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры пучка

| Энергия пучка E, кэВ | Ток пучка в импульсе I, мА | Скорость, м/мин |
|----------------------|----------------------------|-----------------|
| 1,2                  | 20                         | 3               |
| 1,2                  | 30                         | 3               |
| 1,2                  | 40                         | 3               |

В работе экспериментально исследовали влияние режимов электронно-лучевой обработки на микротвердость поверхности полимеров PEI и PET. Микротвердость определяли по методу Виккерса на микротвердомере ПМТ-3 в соответствии с ГОСТ 9450–76, при нагрузке на индентор 100 г и времени выдержки при этой нагрузке 10 сек.

Микротвердость полимера PEI в исходном состоянии составляет 253 МПа (рисунок 1, а), микротвердость полимера PET составляет 225 МПа (рисунок 1, б). После электронно-лучевой обработки при режимах параметра пучка 20 мА и 30 мА микротвердость полимера PEI увеличивается до ~ 350 МПа.

Полимер марки PET показало максимальное значение микротвердости после электронно-лучевой обработки при режиме параметра пучка 30 мА. Дальнейшее увеличение тока пучка до 40 мА приводит к снижению микротвердости полимерных материалов.

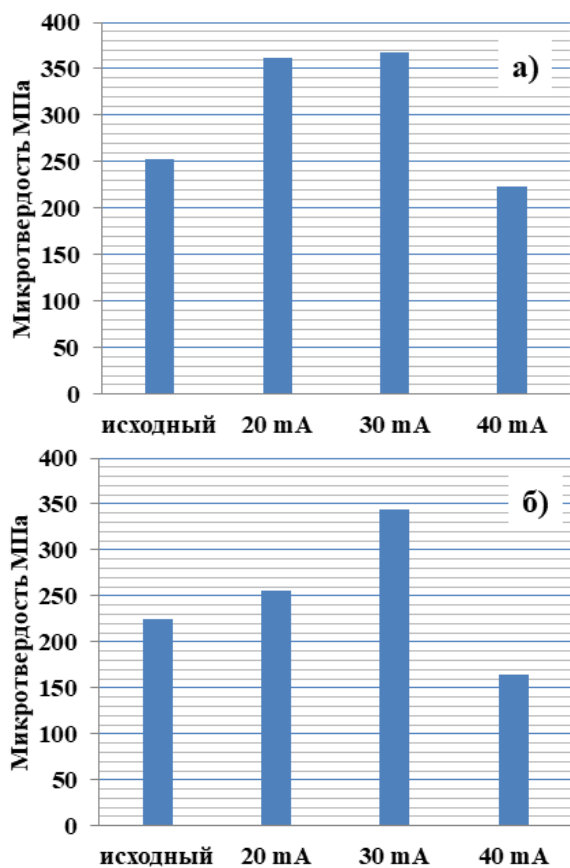


Рисунок 1. Микротвердость образцов полимера: PEI (а); PET (б)

В литературе описаны результаты исследований, посвященных повышению свойств полимеров посредством применения процессов облучения [7–10]. Все эффекты облучения, воздействующие на полимерные материалы, сложно предсказать. Несмотря на простую полимерную структуру, все протекающие в структуре изменения являются достаточно сложными. Поскольку для разрушения химических связей требуется приложение энергии в несколько эВ. Обычно в полимерах происходит либо разрушение, либо образование новых поперечных межмолекулярных связей (сшивки). Однако в большинстве случаев, имеет место и первое или второе. Известно, что образование поперечных межмолекулярных связей в полиэтилене улучшает его сопротивление истиранию, что широко используется в ряде промышленных приложений [11].

В данной работе испытания на износостойкость полимерных материалов до и после электронно-лучевой обработки проведены по схемам «шар - диск» и «плоская поверхность – вращающаяся диск», в соот-

ветствии с международными стандартами ASTM G99-959, DIN50324 и ISO 20808.

Трибологические испытания на трение скольжения проводили на трибометре Micron-tribo. В качестве контртела использовали шарик диаметром 3,0 мм, из сертифицированного материала WC. На рисунке 2 показаны результаты трибологических испытаний в виде объема износа полимерных материалов. Как видно, износостойкость образца после электронно-лучевой обработки увеличивается 1,5–2,0 раза по сравнению с исходным образцом.

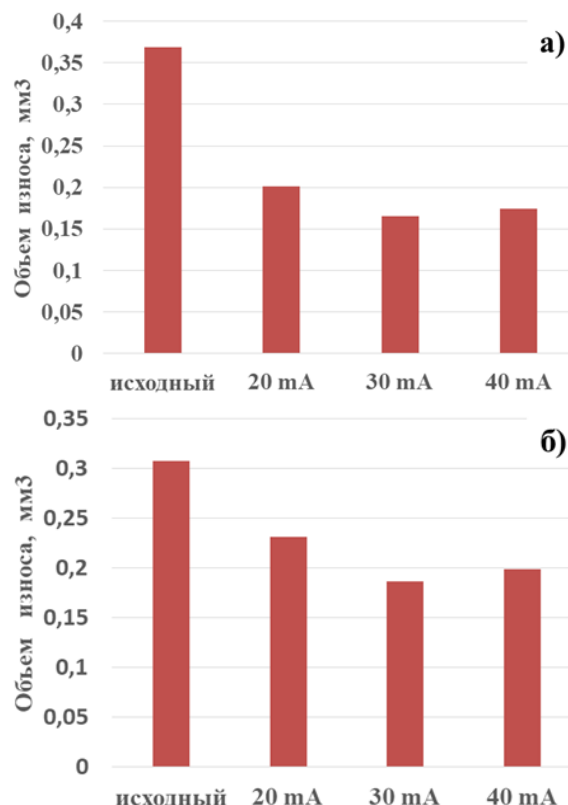


Рисунок 2. Объемный износ полимеров до и после электронно-лучевой обработки: PEI (а); PET (б)

Испытания образцов на абразивное изнашивание на экспериментальной установке для испытаний на абразивное изнашивание при трении не жестко закрепленные частицы абразива по схеме «вращающийся ролик – плоская поверхность» в соответствии с ГОСТ 23.208-79. Результаты испытания полимеров до и после электронно-лучевой обработки показаны на рисунке 3.

Результаты испытания на абразивное изнашивание показывают, что потеря массы образцов после электронно-лучевой обработки меньше, чем до электронно-лучевой обработки, что указывает на повышение стойкости к абразивному износу полимеров. После электронно-лучевой обработки стойкость к абразивному износу полимера PET увеличился на 1,3 раза по сравнению с исходным состоянием.

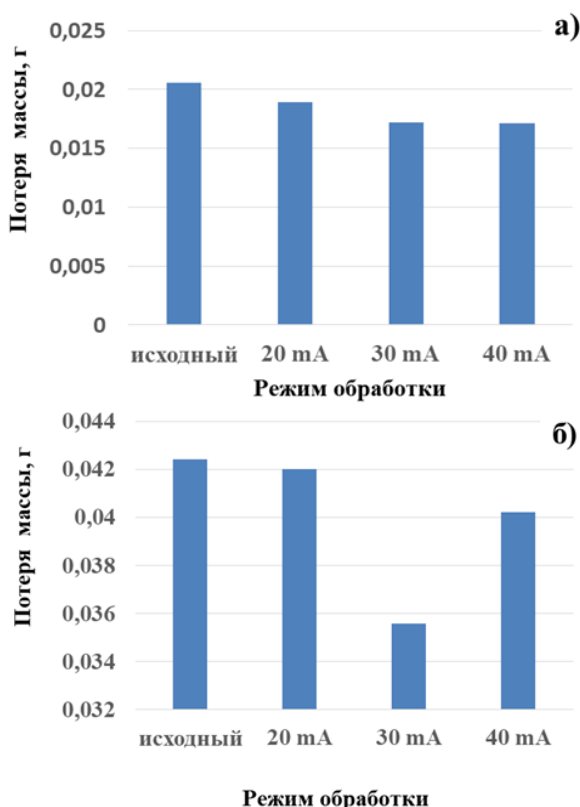


Рисунок 3. Потеря массы образцов полимеров до и после электронно-лучевой обработки: PEI (а); PET (б)

#### ЛИТЕРАТУРА

- Angel J. Satti, Erica C. Molinari, Augusto G. O. de Freitas, Walter R. Tuckart, Cristiano Giacomeli, Andrés E. Ciolino, Enrique M. Vallés. Improvement in abrasive wear resistance of metallocenic polypropylenes by adding siloxane based polymers. *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 188, 2017, P. 100–108.
- Haifa El Zhawi, Marina R. Kaizer, Asima Chughtai, Rafael R. Moraes, Yu Zhang. Polymer infiltrated ceramic network structures for resistance to fatigue and wear. *Dental Materials*, Vol. 32, 2016, P. 1352–1361.
- Aderikha, V.N., Shapovalov, V.A., Krasnov, A.P., and Pleskachevskii, Yu.M., Effect of AerosilOrgano-philization on Tribological Properties of Low-Filled UHMWPE Composites, *Trenie i Iznos*, 2008, vol. 29(4), P. 421–427.
- Y. S. Zoo, J. W. An, D. P. Lim and D. S. Lim. Effect of carbon nanotube addition on tribological behavior of UHMWPE. *TribolLett.* Vol. 16(4) (2004). P. 305–309.
- Пикаев А. К. Новые разработки радиационной технологии в России. *Химия высоких энергий*. Т. 32. – 1999, – С. 3–11.
- Raghu S, Archana K, Sharanappa C, Ganesh S, Devendrappa H. The physical and chemical properties of gamma ray irradiated polymer electrolyte films. *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 426, 2015, P. 55–62.
- E. Oral, A. S. Malhi, O. K. Muratoglu. Mechanisms of decrease in fatigue crack propagation resistance in irradiated and melted UHMWPE. *Biomaterials*. Vol. 27 (2006). P. 917–925.
- K. Yamamoto, T. Masaoka, M. Manaka, H. Oonishi, I. Clarkel, H. Shoji, K. Kawanabe and A. Imakiire. Micro-wear features on unique 100-Mrad cups: Two retrieved cups compared to hip simulator wear study. *Acta Orthop Scand*. Vol. 75 (2004). P. 134–141.
- C Zhu, O. Jacobs, R. Jaskulka, W. Koller, W. Wu. Effect of counterpart material and water lubrication on the sliding wear performance of crosslinked and non-crosslinked ultra high molecular weight polyethylene. *Polymer Testing*. Vol. 23 (2004). P. 665–673.
- E. Oral, K. K. Wannomae, N. Hawkins, W. H. Harris, O. K. Muratoglu. a-Tocopherol-doped irradiated UHMWPE for high fatigue resistance and low wear. *Biomaterials*. Vol. 25 (2004). P. 5515–5522.
- H. McKellop, F. Shen, B. Lu, P. Campbell, and R. Salovey, Development of an Extremely Wear-Resistant Ultra High Molecular Weight Polyethylene for Total Hip Replacements. *J. Orthopedic research* 17 (1999). P. 157–167.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя полученные в работе экспериментальные результаты, можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что механические и трибологические свойства полимерных материалов зависят от режимов электронно-лучевой обработки;
2. Определено, что микротвердость полимера после электронно-лучевой обработки при режиме тока пучка до 30 мА увеличивается в 1,5 раза по сравнению с исходным состоянием;
3. Интенсивность изнашивания полимеров после электронно-лучевой обработки при параметре тока пучка до 30 мА снижается до 30 %, а стойкость к абразивному износу полимера PET увеличилась в 1,3 раза по сравнению с исходным состоянием.

## ПОЛИМЕРЛЕРДІҢ ТОЗУҒА ТӨЗІМДІЛІГІНЕ ЭЛЕКТРОНДЫ СӘУЛЕЛІК ӨНДЕУДІҢ ӘСЕРІ

Б.Қ. Рахадиллов, Д.Б. Буйткенов, К. Акатаев

*С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан Мемлекеттік университеті, Өскемен, Қазақстан*

Бұл жұмыс полимерлі материалдардың физикалық және механикалық қасиеттеріне электронды-сәулелік өндеудің әсерін зерттеуге байланысты (PEI және PET). Электронды-сәулелік өндеуден кейін, 1,2 кэВ энергиясы бар 30 мА сәуле тоғында, полимерлердің микроқаттылығы бастапқы күйге қарағанда 1,5 есе артты. PET полимер үлгілерінің тозу жылдамдығы 30 %-ға дейін төмендеді, және полимердің абразивті тозуға төзімділігі бастапқы күймен салыстырғанда 1,3 есе артты. Жүргізілген зерттеулер нәтижелері полимерлі материалдардың пайдалану сипаттамаларын арттыру үшін электронды-сәулелік өндеуді қолданудың перспективаларын көрсетті.

## EFFECT OF ELECTRON BEAM TREATMENT ON THE WEAR RESISTANCE OF POLYMERS

B.K. Rakhadilov, D.B. Buytkenov, K. Akatan

*S. Amanzholov East Kazakhstan State University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan*

This work is related to the study of the effect of electron-beam processing on the physical and mechanical properties of polymer materials (PEI and PET). After electron-beam processing with a beam current of 30 mA and an energy of 1.2 keV, the microhardness of the polymers increased by a factor of 1.5 compared to the initial state. PET polymer samples show a decrease in wear rate of up to 30 %, and resistance to abrasion of the polymer increased by 1.3 times compared to the original sample. The results of the conducted studies have shown the prospects of using electron irradiation for increasing the operational characteristics of polymer materials.

УДК 620.193.55

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОГЛОЩЕНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В СОРБЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

<sup>1)</sup> Кульсартов Т.В., <sup>1,2)</sup> Заурбекова Ж.А., <sup>1)</sup> Чихрай Е.В.<sup>1)</sup> АО «Казахстанско-Британский технический университет», Алматы, Казахстан<sup>2)</sup> Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В настоящей статье приведена модель, позволяющая описать процесс поглощения изотопов водорода исследуемым образцом при следующих условиях: тонкий образец с известными геометрическими размерами насыщается из газовой фазы изотопами водорода при исследуемой температуре в камере известного объема и начальном давлении изотопов водорода в камере. С помощью разработанной модели удалось отлично описать экспериментальные результаты по поглощению трехкомпонентной смеси изотопов водорода и определить параметры взаимодействия изотопов водорода с ванадиевым сплавом V4Cr4Ti. В частности были определены константа растворимости и коэффициент диффузии изотопов водорода в сплаве, а также параметры их аррениусовской зависимости.

В дальнейшем предложенная модель может быть использована для моделирования процессов накопления водорода в установках ядерных реакторов (ЯР), термоядерных реакторов (ТЯР) и нефтехимических производств.

### ВВЕДЕНИЕ

Интерес к исследованиям взаимодействия изотопов водорода с материалами определяется широким кругом проблем, которые возникают в таких развивающихся областях промышленности и энергетики как: ядерная и термоядерная энергетика, водородная энергетика, нефтехимическая промышленность, водородные источники питания для автомобилей, беспилотников и пр.

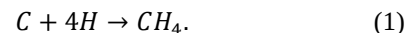
Моделирование процессов взаимодействия материалов с водородом важно для описания процессов его поглощения с целью дальнейшей оценки разнообразных процессов, которые происходят в материале, и которые важны с точки зрения безопасности и прогнозирования эксплуатационных характеристик оборудования.

В термоядерных установках, которые работают на дейтерий-тритиевом топливе, важно знать баланс распределения трития по установке с целью обеспечения радиационной безопасности и для улучшения экономичности установки, посредством эффективного использования трития [1].

Для ядерных энергетических установок важно иметь оценки количества водорода в циркониевых оболочках ТВС, твэлах для недопущения критических значений, которые могут привести к их водородному охрупчиванию [2–4].

Также проблема водородно-стимулированного трещинообразования актуальна для нефтехимических производств. Одним из основных эксплуатационных факторов охрупчивания оборудования нефтехимических заводов, работающих в условиях длительного воздействия водорода при повышенных температурах и давлении (сосуды, печные змеевики и трубопроводы в установках каталитического реформинга и гидроочистки) является водородная хрупкость, которая развивается в условиях водородной коррозии [5, 6].

Водородная коррозия, по сути, есть повреждение стали и ее охрупчивание под влиянием длительного воздействия водородной среды при повышенных (>473 K) температурах эксплуатации в результате физико-химического взаимодействия водорода с отдельными компонентами и/или фазами сплава. Водородное повреждение металла с примесью углерода при повышенных температурах связано с образованием продуктов реакции между водородом и углеродом по типу



В углеродистой стали суммарная химическая реакция между углеродом, связанным в карбидах железа, и водородом может быть представлена в виде



Образующийся в результате реакции метан покидает металл и/или образует внутренние полости и трещины, наполненные газообразным метаном под высоким давлением. В поверхностных слоях металла формируются обезуглероженные зоны.

Особенно стоит упомянуть такую область как водородные источники питания для автомобилей, беспилотников, локомотивов на водородном топливе. Вопросы поглощения (и выделения) водорода из водородных источников питания для данного транспорта напрямую определяют их эффективность.

Как видно из вышесказанного, оценка количества водорода в материалах, разработка методов моделирования процессов поглощения водорода материалами является значимой задачей.

В настоящей статье приведена модель, позволяющая описать процесс поглощения изотопов водорода исследуемым образцом при следующих условиях: тонкий образец с известными геометрическими размерами ( $H$  – толщина образца,  $S$  – площадь его поверхности), насыщается из газовой фазы изотопами водорода при исследуемой температуре

( $T_{cam}$ ) в камере известного объема ( $V_{cam}$ ); начальное давление изотопов водорода в камере  $P_0$ .

### МОДЕЛЬ

Одним из наиболее результативных подходов к исследованию диффузионных процессов в твердом теле является использование численных методов и компьютерного моделирования, которое в большинстве практических случаев дает возможность обойти трудности аналитического описания. Такой подход особенно применим для решения сложных систем дифференциальных уравнений, к которым сводится большинство задач массопереноса. Для решений систем дифференциальных уравнений в частных производных авторами использовался метод конечных элементов.

Прежде всего, кратко опишем основные положения модели: Поглощение водорода определяется диффузией водорода в образец и не зависит от процессов на поверхности. Данное приближение является верным для большинства экспериментальных случаев, и свидетельствует о том, что приповерхностная равновесная концентрация водорода в образце наступает гораздо быстрее, чем протекает диффузия водорода в образец.

Когда коэффициент диффузии не зависит от пространственных координат, дифференциальное уравнение диффузии имеет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (3)$$

здесь  $C(x, t)$  – концентрация диффундирующего газа;  $D$  – коэффициент диффузии, причем коэффициент диффузии имеет аррениусовскую зависимость:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_d}{RT}\right), \quad (4)$$

здесь  $D_0$  – предэкспоненциальный множитель коэффициента диффузии;  $E_d$  – энергия активации диффузии;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура.

Полагаем, что концентрация в приповерхностных областях равна равновесной растворимости:

$$C(0, t) = K_s \sqrt{p}, \quad (5)$$

$$C(H, t) = K_s \sqrt{p}, \quad (6)$$

здесь  $K_s = K_{s0} \exp\left(-\frac{E_s}{RT}\right)$  – растворимость;  $E_s$  – энергия растворения;  $p$  – парциальное давление газа в системе.  $K_{s0}$  слабо зависит от температуры, поэтому в большинстве случаев его считают константой для данной комбинации газ-металл.

Соотношения (5) и (6) называются законом Сиверта. Из него следует, что равновесная концентрация под поверхностью пропорциональна  $\sqrt{p}$ .

В начальный момент времени в образце водорода нет, концентрация равна:

$$C(x, 0) = 0. \quad (7)$$

Для случая, когда давление в камере поддерживается постоянным, решение данной задачи не представляет труда и может быть описано следующим аналитическим выражением [7]:

$$C(x, t) = K_s \sqrt{p} \left[ 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{2k+1} e^{-\frac{(2k+1)^2 \pi^2 D t}{H^2}} \times \right. \\ \left. \times \sin \frac{(2k+1)\pi}{H} x \right]. \quad (8)$$

Для варианта, когда давление в камере меняется, за счет поглощения части газа задача не имеет аналитического решения и может быть описана в рамках предлагаемого ниже моделирования, которое основано на последовательном решении задачи диффузии (3) в интересующем временном промежутке.

Решение задачи (3) для граничных условий (5), (6) и начальном распределении концентрации  $C(x, 0) \neq 0$  будет выглядеть следующим образом:

$$C(x, t) = K_s \sqrt{p} \times \\ \times \left( 1 + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\pi) - 1}{n} \sin \frac{n\pi x}{H} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D t}{H^2}\right) \right) + \\ + \frac{2}{H} \sum_{m=0}^{\infty} \sin \frac{m\pi x}{H} \exp\left(-\frac{m^2 \pi^2 D t}{H^2}\right) \times \\ \times \int_0^H C(\xi, 0) \sin \frac{m\pi \xi}{H} d\xi. \quad (9)$$

Данное выражение получается при решении задачи методом Фурье, например как показано в [8].

Разбивая интересующий для моделирования период времени ( $T$ ) на  $J_0$  интервалов с шагом  $\Delta t = T/J_0$ , а также проводя разбиение по толщине образца на  $I_0$  интервалов с шагом  $\Delta H = H/I_0$  можно записать следующие рекуррентно рассчитываемые выражения для концентрации газа в образце и давления в камере:

$$C_{i,j+1} = K_s \sqrt{P_0 - R \frac{T_{cam}}{V_{cam}} \sum_{k=0}^{I_0} C_{k,j} \Delta H S} \times \\ \times \left( 1 + \frac{2}{\pi} \sum_{k1=1}^{100} \left[ \frac{\cos(k1\pi) - 1}{k1} \sin \frac{k1\pi \Delta H}{H} \exp\left(-\frac{k1^2 \pi^2 D \Delta t}{H^2}\right) \right] + \right. \\ \left. + \frac{2}{H} \sum_{k2=0}^{100} \sin \frac{k2\pi \Delta H}{H} \exp\left(-\frac{(k2)^2 \pi^2 D \Delta t}{H^2}\right) \times \right. \\ \left. \times \sum_{m=0}^{I_0} \left[ C_{m,j} \cdot \sin \frac{\pi \Delta H m}{H_0} \right] \Delta H \right], \quad (10)$$

$$P_{j+1} = P_0 - R \frac{T_{cam}}{V_{cam}} \sum_{k=0}^{I_0} C_{k,j} \Delta H S. \quad (11)$$

Расчет ведется следующим образом:

Первоначально рассчитывается распределение концентрации на первом временном шаге (через  $\Delta t$  секунд от начала поглощения), здесь используется решение (9) для граничных и начальных условий (5)–(7).

Далее пересчитывается новое давление в камере, с учетом количества водорода, поглощенного образцом за время  $\Delta t$ .

После на втором шаге снова используется решение (9) для граничных условий (5), (6) и для начального условия распределении концентрации  $C(x, 0)$  с учетом давления и концентрации газа по толщине образца, рассчитанного на предыдущем шаге.

# РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Используя вышеприведенный подход, была написана программа в программной среде MathCad 14, с помощью которой были промоделированы результаты экспериментов авторов статьи по поглощению изотопов водорода ванадиевыми сплавами [9].

Выбор данных для моделирования определялся тем, что они полностью соответствовали положениям, заложенным в модели: эксперименты по сорбции проводились в условиях не скомпенсированного снижения давления в камере с исследуемыми образцами.

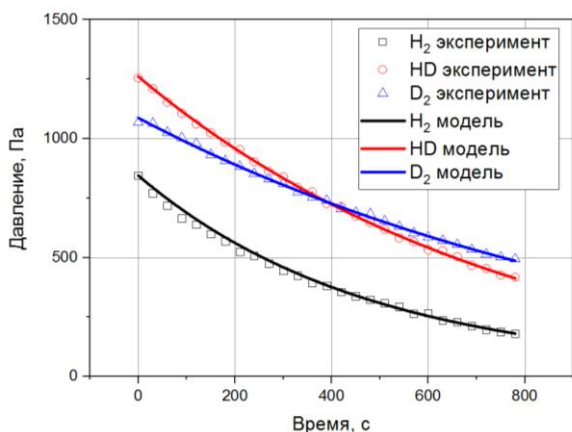


Рисунок 1. Результаты моделирования снижения давления изотопов водорода в камере при сорбционном эксперименте при температуре образца сплава V4Cr4Ti  $T = 373\text{ K}$

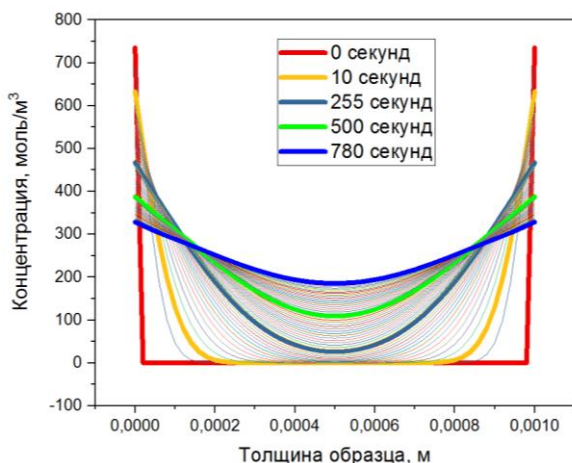


Рисунок 2. Изменение концентрации водорода по толщине образца в процессе поглощения

Варьируя параметры аррениусовской зависимости для константы Сиверта и коэффициента диффузии, были получены модельные зависимости снижения давления изотопов в камере при сорбционном эксперименте при температуре образца ванадиевого сплава V4Cr4Ti  $T=373\text{ K}$  (см. рисунок 1). Как видно из рисунка, моделирование позволило хорошо описать процесс поглощения изотопов водорода образцом и определить оптимальные параметры взаимодействия изотопов водорода с образцом (см. таблицу).

Таблица. Параметры константы растворимости и коэффициента диффузии изотопов водорода в ванадиевом сплаве V4Cr4Ti

|                                                   | H <sub>2</sub>       | HD                   | D <sub>2</sub>       |
|---------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $S_0$ , моль/(Па <sup>1/2</sup> ·м <sup>3</sup> ) | $1,7 \cdot 10^{-2}$  | $1,5 \cdot 10^{-2}$  | $1,4 \cdot 10^{-2}$  |
| $E_s$ , кДж/моль                                  | 32                   | 34                   | 37                   |
| $D_0$ , м <sup>2</sup> /с                         | $9,5 \cdot 10^{-10}$ | $8,9 \cdot 10^{-10}$ | $7,5 \cdot 10^{-10}$ |
| $E_D$ , кДж/моль                                  | 14                   | 16                   | 17                   |

Характер изменения во времени концентрации газа (водорода) по толщине образца приведен на рисунке 2.

Как видно из рисунка, несмотря на то, что приповерхностная концентрация водорода снижается (за счет уменьшения давления газа в камере и соответственно на поверхности образца), общее количество водорода в образце увеличивается.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью разработанной модели, описывающей поглощение газа тонкими исследуемыми образцами, удалось отлично описать экспериментальные результаты по поглощению трехкомпонентной смеси изотопов водорода и определить параметры взаимодействия изотопов водорода с ванадиевым сплавом V4Cr4Ti. В частности, были определены константа растворимости и коэффициент диффузии, а также параметры их аррениусовской зависимости.

В дальнейшем предложенная модель может быть использована для моделирования процессов накопления водорода в установках ЯР, ТЯР, нефтехимических производств и т.д.

Работа выполнена в рамках программно-целевого финансирования по научным, научно-техническим программам на 2018–2020 годы (номер программы BR05236800) Министерства образования и науки Республики Казахстан.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Субботин, М.Л. Обзор состояния исследований демонстрационных термоядерных реакторов в мире / М.Л. Субботин, Д.К. Курбатов, Е.А. Филимонова // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. – 2010. – № 3. – С. 55–74.
2. Иванова, С.В. Наводороживание циркониевых изделий в процессе изготовления и эксплуатации фактор, ограничивающий ресурс их работы в реакторах ВВЭР и РБМК / С.В. Иванова, А.К. Шиков, О.В. Бочаров // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2003. – № 8. – С. 40–47.
3. Шмаков, А.А. Теоретическое исследование кинетики гидридного растрескивания в сплавах циркония / А.А. Шмаков, Б.А. Калинин, А.Г. Иолтуховский // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2003. – № 8. – С. 35–40.

4. Афанасьева, Е.Ю. Моделирование гидридного разрушения твэлов в водоохлаждаемых реакторах / Е.Ю. Афанасьева, И.А. Евдокимов, В.В. Лиханский, А.А. Сорокин, О.В. Хоружий // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы. – 2004. – № 2. – С. 225–233.
5. Горицкий, В.М. Диагностика металлов / В.М. Горицкий. – М.: Metallurgizdat, 2004. – 412 с.
6. Арчаков, Ю.И. Водородная коррозия стали / Ю.И. Арчаков. – М.: Metallurgiya, 1985. – 512 с.
7. Crank, J. The Mathematics of Diffusion / J. Crank. – Oxford University Press, 1980. – 424 p.
8. Бекман И.Н. Математика диффузии Учебное пособие. – М.: ОнтоПринт, 2016. – 400 с.
9. Kulsartov, T. Early evaluation of hydrogen isotopes separation by V4Cr4Ti-based sorbents at low temperatures / T. Kulsartov, V. Shestakov, Ye. Chikhray, I. Kenzhina, S. Askerbekov, Yu. Gordienko, Yu. Ponkratov, Zh. Zaurbekova // Fusion Engineering and Design. – Vol. 113. – 2016. – P. 303–307.

## СОРБЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ К СЕПЕГЕ ИЗОТОПТАРЫНЫҢ СІПІРУ ПРОЦЕСІН МОДЕЛЬДЕУ

<sup>1)</sup> Т.В. Кульсартов, <sup>1,2)</sup> Ж.А. Заурбекова, <sup>1)</sup> Чихрай Е.В.

<sup>1)</sup> «Қазақстан-Британ техникалық университеті» АҚ, Алматы, Қазақстан  
<sup>2)</sup> ҚР ҰАӨ РМҚ «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Осы мақалада біз төменде көрсетілген шарттарда зерттелетін үлгімен септегі изотоптарының сіпiрiлуін сипаттауға мүмкіндік беретін модель ұсынамыз: танымал геометриялық өлшемдері бар жұқа үлгі белгілі көлемдегі камерада және осы камерадағы бастапқы септектік изотоптық қысыммен зерттелетін температурада септегі изотоптарымен газ фазасынан қаныққан. Құрастырылған модельді пайдалана отырып, септегі изотоптарының үш компонентті қоспасын сіпiру бойынша эксперименталдық нәтижелерді және V4Cr4Ti ванадий қорытпасы бар септегі изотоптарының өзара әрекеттесу параметрлерін анықтауға болады. Атап айтқанда, қорытпадағы ерігіштігі тұрақты және септегі изотоптарының диффузия коэффициенті, сондай-ақ олардың аррениус тәуелділігінің параметрлері анықталды.

Болашақта ұсынылған модель ядролық реакторлық (ЯР) қондырғыларда, термоядролық реакторларда (ТЯР) және мұнай-химия өнеркәсібінде септекті сақтау процестерін модельдеу үшін пайдаланылуы мүмкін.

## SIMULATION OF THE PROCESSES OF HYDROGEN ISOTOPES ABSORPTION IN SORPTION EXPERIMENTS

<sup>1)</sup> T. Kulsartov, <sup>1,2)</sup> Zh. Zaurbekova, <sup>1)</sup> Ye. Chikhray

<sup>1)</sup> JSC “Kazakhstan-Britain Technical University”, Almaty, Kazakhstan  
<sup>2)</sup> Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

This paper presents a model that allows to describe the absorption of hydrogen isotopes by the investigated sample under the following conditions: a thin sample with known geometric dimensions is saturated from the gas phase with hydrogen isotopes at the given temperature in a chamber of known volume and the initial hydrogen isotope pressure in the chamber. Using the developed model, it was possible to describe perfectly the experimental results on the absorption of a three-component mixture of hydrogen isotopes and to determine the interaction parameters of hydrogen isotopes with vanadium V4Cr4Ti alloy. In particular, the solubility constant and the diffusion coefficient of hydrogen isotopes in the alloy were determined, as well as the parameters of their Arrhenius dependences.

In the future, the proposed model can be used to simulate the processes of hydrogen storage in nuclear reactor facilities (NR), thermonuclear reactors (TNR) and petrochemical industries.

УДК 66.096.5; 621.039.548.8

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ КАРБИДА УРАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ**

Семейко К.В.

*Институт газа НАН Украины, Киев, Украина*

Карбид урана является одним из перспективных видов топлива для ядерных реакторов. Существующие технологии получения карбида урана характеризуются высокими энергозатратами и технологическими сложностями. Создание энергоэффективной технологии получения карбида урана является актуальной задачей. Автором предложена возможность получения карбида урана с использованием технологии электротермического псевдоожиженного слоя. В статье рассмотрены два варианта получения карбида урана – восстановлением металлического урана в атмосфере метана и капсулированием  $UO_2$  пироуглеродом с дальнейшим карботермическим восстановлением. Проведённые термодинамические расчеты позволили определить оптимальную температуру проведения процессов. Предложена схема реактора с электротермическим псевдоожиженным слоем и описаны основные механизмы тепло- и массообмена в данном реакторе во время процесса получения карбида урана и нанесения пироуглеродного покрытия на  $UO_2$ . Полученные результаты будут использованы при дальнейших экспериментальных исследованиях.

**ВВЕДЕНИЕ**

Монокарбид урана и смешанные монокарбиды урана и плутония, обладающие рядом благоприятных физических свойств, являются потенциально важными видами ядерного топлива и воспроизводящими материалами. Они имеют высокую размерную стабильность под облучением, и их использование в ядерных реакторах позволяет достигнуть глубокого выгорания и, следовательно, снизить стоимость ядерного топливного цикла. Характерными особенностями простых и смешанных карбидов урана и плутония являются: высокая, по сравнению с оксидами, теплопроводность, повышенная плотность и лучшая способность к удержанию газообразных продуктов деления (ГПД). Эти факторы позволяют отметить следующие преимущества использования карбидов в качестве ядерного топлива или воспроизводящих материалов:

а) топливные сердечники могут иметь больший диаметр из-за более высокой теплопроводности, что будет способствовать более низкой стоимости изготовления твэлов и меньшим потерям нейтронов в конструкционных материалах;

б) температура топлива является более низкой по сравнению с температурой оксидного топлива даже при более высокой удельной мощности, что позволяет уменьшить выделение ГПД в процессе облучения;

в) рабочая температура карбидного топлива существенно ниже его предельной тепловой нагрузки, что приводит к потенциальному увеличению уровня безопасной работы из-за более низкого значения отрицательного эффекта Доплера;

г) лучшее удержание ГПД карбидным топливом уменьшает количество ГПД в зазоре топливо-оболочка и снижает давление газа под оболочкой твэла;

д) более высокая плотность карбидного топлива по сравнению с оксидным может при более низком

обогащении приводить к большим скоростям расширенного воспроизводства, более короткому времени удвоения и большей длительности кампании топлива;

е) совместимость карбидного топлива с натрием повышает безопасность работы быстрых ядерных реакторов.

В настоящее время отсутствуют конструкции твэлов с карбидным топливом, которые прошли бы всесторонние испытания и показали бы работо- и конкурентоспособность по сравнению с твэлами с оксидным топливом. Однако в связи с известными недостатками оксидного топлива существует необходимость в исследовании свойств альтернативных видов топлива, какими являются карбиды урана и плутония [1].

Карбид урана UC получают взаимодействием с углеродом или метаном металлического урана при 625–900 °С. Восстановлением  $UO_2$  или  $U_3O_8$  коксом или графитом при 1800–1900 °С в дуговой или индукционной плавке. При реакции газообразного гексафторида или тетрахлорида урана с кальцием и карбидом кальция.  $U_2C_3$  синтезируют при нагревании смеси UC и  $UC_2$  при 1250–1800 °С в вакууме или разложением  $UC_2$  при 1300–1600 °С. Дикарбид  $UC_2$  получают взаимодействием U или его оксидов с углеродом или метаном при температуре выше 2400 °С [2]. Первые исследования, направленные на получения карбида урана в реакторах с псевдоожиженным слоем, описаны в [3–4].

Данные процессы являются достаточно энергозатратными и имеют целый ряд технологических трудностей, поэтому создание новой энергоэффективной технологии для получения карбида урана является актуальной задачей.

**Методы исследования**

Термодинамические расчеты проводились с использованием программы TERRA. В основу алго-

ритма данного программного комплекса положен универсальный термодинамический метод определения характеристик равновесия гетерогенных систем, основанный на фундаментальном принципе максимума энтропии [5]. Для описания процессов в электротермическом псевдоожиженном слое использовались методы теории теплообмена.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Важными преимуществами технологии электротермического псевдоожиженного слоя (ЭТПС) перед другими способами термической обработки материалов являются высокая интенсивность внутреннего и внешнего тепло- и массообмена, однородность слоя и возможность работы в непрерывном режиме [6–7], а также достижение высоких до 3000 °С температур.

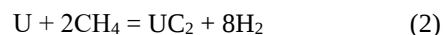
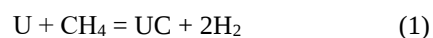
В Институте газа НАН Украины проводятся исследования по получению чистого пироуглерода пиролизом углеводородных газов в реакторах с ЭТПС [8–12]. Учитывая данные предыдущих исследований и преимущества технологии ЭТПС, автором рассмотрены два возможных варианта получения карбида урана:

1) восстановление металлического урана в атмосфере метана при  $T = 800\text{--}1500\text{ К}$  (для получения UC) и  $T = 2800\text{--}3200\text{ К}$  (для получения UC<sub>2</sub>) в реакторе с ЭТПС (применение ЭТПС даст возможность увеличить энергоэффективность процесса);

2) капсулирование UO<sub>2</sub> пироуглеродом в ЭТПС по аналогии с [8], с дальнейшим карботермическим восстановлением при  $T = 2000\text{--}2400\text{ К}$  (вследствие высокой чистоты пироуглеродного покрытия [13] синтезированный карбид урана должен обладать более высокой чистотой, чем при восстановлении коксом).

Давление в обоих случаях 0,1 МПа.

**Рассмотрим первый вариант.** Для определения количества реагирующих веществ запишем уравнение реакций:



На рисунке 1 приведены основные результаты термодинамического расчета в соответствии с стехиометрическим соотношением в реакции (1).

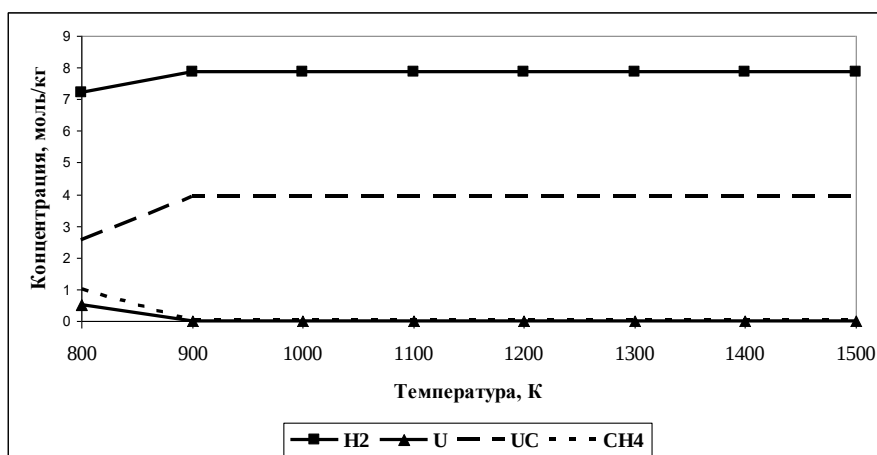


Рисунок 1, а. Равновесные кривые системы 1 моль U + 1 моль CH<sub>4</sub>

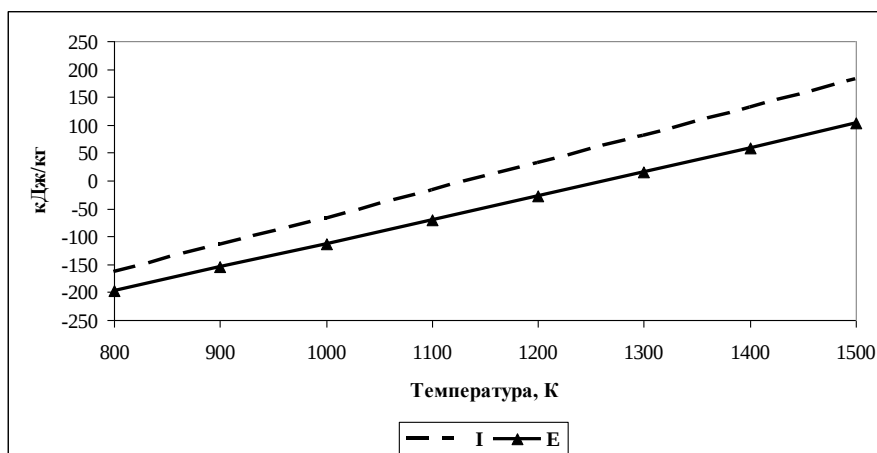


Рисунок 1, б. Зависимость полной энтальпии (I) и полной внутренней энергии (E) от температуры при карботермическом восстановлении U до UC

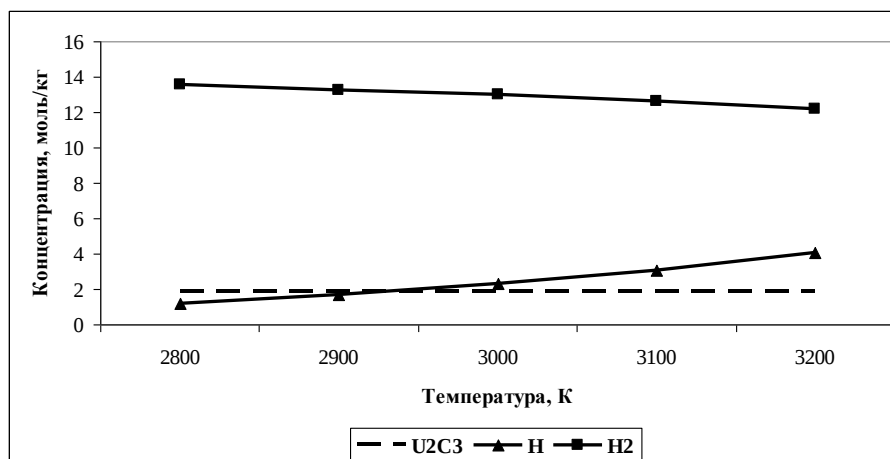


Рисунок 2, а. Равновесные кривые системы 1 моль U + 2 моль CH<sub>4</sub>

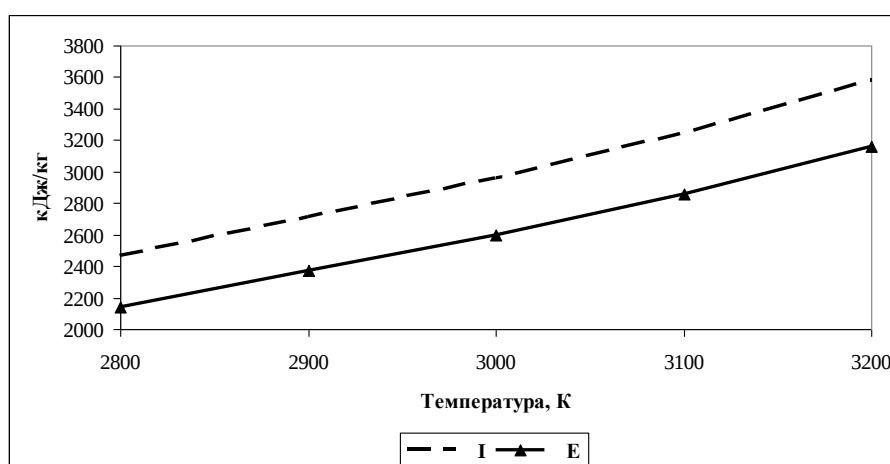


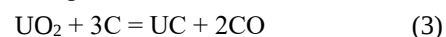
Рисунок 2, б. Зависимость полной энтальпии (I) и полной внутренней энергии (E) от температуры при карботермическом восстановлении U до UC<sub>2</sub>

Как видно из рисунка 1, а, с 900 К достигается термодинамическое равновесие, при котором уран полностью реагирует с метаном. Полная энтальпия и полная внутренняя энергия являются аддитивными функциями, поэтому они могут быть вычислены как сумма вкладов всех простых веществ, образующих систему.

На рисунке 2 приведены основные результаты термодинамического расчета в соответствии со стехиометрическим соотношением в реакции (2) (система 1 моль U + 2 моль CH<sub>4</sub>, T = 2800–3200 К).

Согласно рисунку 2, а, в результате реакции получается UC<sub>2</sub>, однако в дальнейшем образуется атомарный водород. Рисунок 2, б показывает равномерное увеличение I и E.

**Рассмотрим второй вариант (карботермического восстановления оксидов урана).** При температуре пиролиза T = 900–1275 К UO<sub>2</sub> будет химически инертно вести себя в атмосфере метана, поэтому расчет первой стадии процесса не приведен в статье. Для определения количества реагирующих веществ запишем уравнение реакций:



На рисунке 3 приведены основные результаты термодинамического расчета.

Как видно из рисунка 3, а, начало образования UC происходит при T = 2200 К (о чем также свидетельствует резкое увеличение I и E), после 2300 К концентрация UC не меняется.

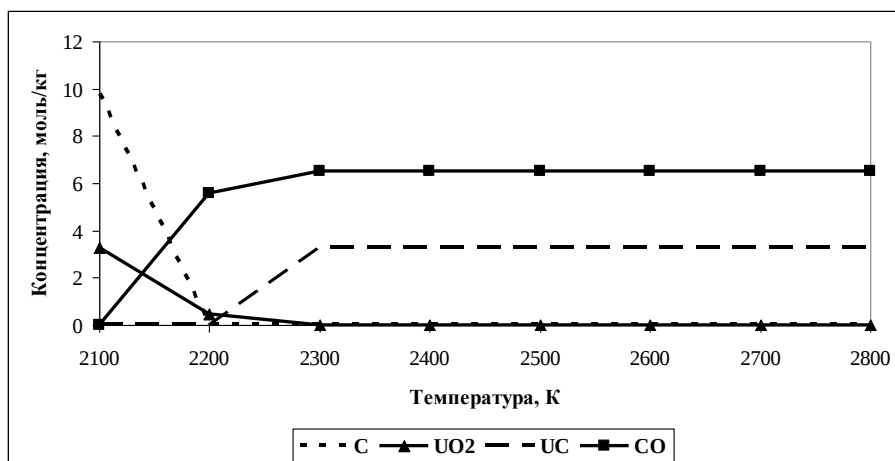


Рисунок 3, а. Равновесные кривые системы 1 моль U + 3 моль C

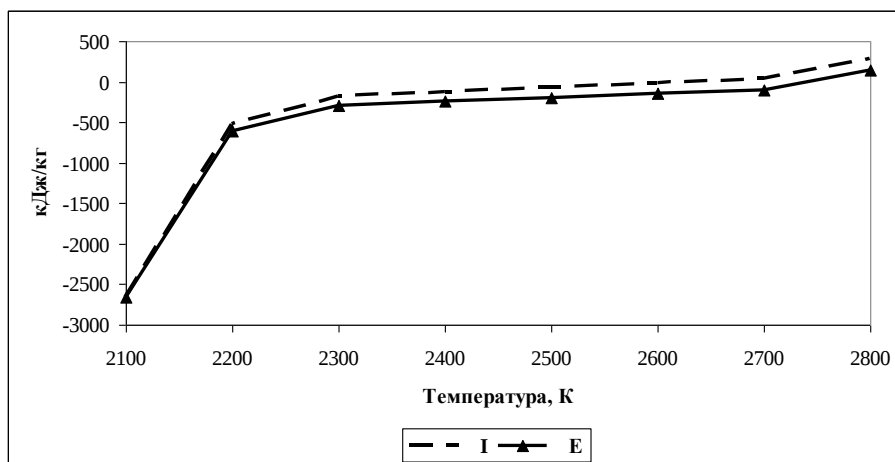


Рисунок 3, б. Зависимость полной энтальпии (I) и полной внутренней энергии (E) от температуры при карботермическом восстановлении UO<sub>2</sub> углеродом

#### Описание основных механизмов тепло- и массообмена в реакторе с ЭТПС во время процесса получения карбида урана

Основными механизмами нагрева дисперсионного материала в реакторах с ЭТПС является излучение, резистивный нагрев (пропускание электрического тока через электрод и слой) и конвекция. Эти процессы описываются известными уравнениями теплообмена [14]:

$$q_l = \frac{\sigma_0 \cdot (T_э^4 - T_q(\tau)^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_m} + \frac{1}{\varepsilon_{ПС}} - 1\right)}, \quad (4)$$

где,  $q_l$  – плотность теплового потока излучением, Вт/м<sup>2</sup>,  $\sigma_0$  – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>,  $T_э$  – температура электрода; К,  $T_q(\tau)$  – температура частицы UO<sub>2</sub> или U во времени, К;  $\varepsilon_m$  – степень черноты частицы UO<sub>2</sub> или U;  $\varepsilon_{ПС}$  – степень черноты псевдооживленного слоя,  $\varepsilon_{ПС} = \varepsilon_m^{0,31}$ .

$$q_K = \alpha \cdot (T_э - T_q), \quad (5)$$

где,  $q_K$  – плотность теплового потока конвекцией, Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт / (м<sup>2</sup>·К) [15]:

$$\alpha \approx \lambda_{сл} \delta_{гн}, \quad (6)$$

где,  $\lambda_{сл}$  – коэффициент теплопроводности частиц UO<sub>2</sub> или U, Вт / (м·К);  $\delta_{гн}$  – толщина газовой плёнки.

$$q_{PH} = P_{пол} / F_{сл}, \quad (7)$$

где,  $q_{PH}$  – плотность теплового потока резисторным нагревом Вт/м<sup>2</sup>,  $P_{пол}$  – положительная мощность, Вт.

Также следует отметить теплоту, вносимую внешним нагревателем:

$$q_{BH} = (I^2 R \tau) / F_{BH}, \quad (8)$$

где,  $q_{BH}$  – плотность теплового потока внешним нагревателем Вт/м<sup>2</sup>,  $I$  – сила тока, подаваемого на нагреватель, А;  $\tau$  – время нагревания, ч,  $F_{BH}$  – площадь внешнего нагревателя, м<sup>2</sup>.

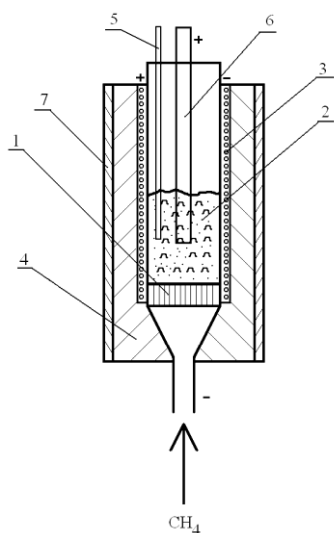
Расчетным уравнением массообмена можно представить следующее выражение:

$$M_C = \beta \cdot F_q \cdot (C_{Снач} - C_{Скон}), \quad (9)$$

где,  $M_C$  – количество углерода, передаваемое из газа на частицы, моль/ч;  $\beta$  – коэффициент массообмена, м/ч;  $C_{\text{нач}}$  – начальная концентрация углерода в метане, моль/м<sup>3</sup>;  $C_{\text{кон}}$  – концентрация углерода в метане после прохождения процесса, моль/м<sup>3</sup>. Входящий в уравнение (9) коэффициент массообмена учитывает все особенности процесса и является мерой интенсивности процесса.

**Предложенная схема реактора с ЭТПС, для проведения процессов получения карбида урана**

Для процесса, описанного в реакции (1), и первой стадии (нанесения пироуглеродного покрытия для дальнейшего восстановления) по реакции (3) можно использовать схему реактора с ЭТПС, описанную в [16]. Учитывая высокую плотность  $\text{UO}_2$  и  $\text{U}$  в качестве газораспределительного устройства, вместо колпачка, будет использоваться решётка. С учётом данных обстоятельств, а также описанных выше механизмов тепло- и массообмена, для лабораторных исследований предложена следующая схема реактора с ЭТПС (рисунок 4).



1 - газораспределительная решётка, 2 - реакционная зона (псевдоожиженный слой, созданный из порошкового ( $\text{UO}_2$  или  $\text{U}$ ), 3 - внешний нагреватель, 4 - теплоизоляция, 5 - термопара, 6 - электрод, 7 - металлический корпус

Рисунок 4. Схема реактора с ЭТПС для получения карбида урана по реакции (1) и нанесения пироуглеродного покрытия на оксид урана

Реактор работает следующим образом: через газораспределительную решётку подают метан, после в реакционную зону в зависимости от процесса загружают порошок  $\text{UO}_2$  или  $\text{U}$ . Подают ток на внешний нагреватель, температуру измеряют термопарой 5 или оптическим пирометром. После выхода на режим, для интенсификации процесса, через электрод 6 подают электрический ток. После выдержки заданного времени материал выгружают через решётку 1 путём прекращения подачи метана. При необходимости внутрь электрода вводят термопару. Для проведения процессов, описанных в уравнениях (2) и (3), реактор с ЭТПС дополнительно оснащают теплоизоляцией, охлаждающей водой и герметизируют по принципу, описанному в [14]. Процесс восстановления  $\text{UO}_2$ , покрытого пироуглеродом, можно также проводить в других высокотемпературных печах.

**Выводы**

Проведённые термодинамические расчеты показали, что для получения  $\text{UC}$  при прямом восстановлении урана метаном оптимальная температура 800 К, для получения  $\text{UC}_2$  оптимальная температура является 2800 К, при увеличении температуры выше 2900 К существенно повышается выход атомарного водорода. Восстановление  $\text{UO}_2$  пироуглеродом эффективнее всего проводить при температуре 2300 К. На основе полученных результатов предложена схема лабораторного реактора с ЭТПС для восстановления  $\text{U}$  метаном, а также нанесения пироуглеродного покрытия на  $\text{UO}_2$ . При обеспечении конструкционных и технологических усовершенствований представленный реактор в перспективе можно использовать для высокотемпературного восстановления  $\text{UO}_2$  пироуглеродом. Полученные результаты будут использованы при дальнейших экспериментальных исследованиях.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Годин Ю.Г. Карбидное ядерное топливо / Ю.Г. Годин, А.В. Тенишев // Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2007. – 68 с.
2. Волкович В. А. Металлургия урана и технология его соединений: курс лекций : в 3 ч. / В. А. Волкович, А. Л. Смирнов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – Ч. 3. – 140 с.
3. Petkus E.J., Tevebaugh A.D., Payne C., Bartos J.P. The synthesis of stoichiometric uranium mono carbide in a fluidized bed by the uranium metal-hydrocarbon gas reaction, Chem. Eng. Prog. Symp. Ser., 62(67), 76, 1966.
4. Hyde K.R., Landsman D.A., Morris, J.B., Seddon W.E., Tulloch H.J. The Preparation of Uranium Nitride and Carbonitrides from Uranium Oxide in a Fluidized Bed, U.S. Atomic Energy Research and Development Report ANL-6902, Argonne, National Laboratory, Argonne, IL, 1964.
5. Белов Г.В., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 96 с
6. Gupta C. K. and Sathiyamoorthy D. Fluid Bed Technology in Materials Processing. New York: CRC Press LLC, 1999. 512 p.

7. Бородуля В. А. Высокотемпературные процессы в электротермическом кипящем слое. Минск: Наука и техника, 1973. 176 с.
8. Богомолов В.А. Капсулирование кварцевого песка пироуглеродом в электротермическом псевдоожиге / В.А. Богомолов, А.П. Кожан, Б.И. Бондаренко, А.И. Ховавко, К.В. Семейко // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2013. – № 5. – С. 36–40.
9. Семейко К.В. Исследование процесса осаждения твердого углерода при пиролизе углеводородных газов / К.В. Семейко, В.К. Безуглый, А.П. Кожан, Б.И. Бондаренко // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2015. – № 2. – С. 18 – 24.
10. Simeiko K. Thermal influence of microdischarge plasma on the process of receiving of quartz sand encapsulated by pyrocarbon / K. Simeiko // Proceedings of the National Aviation University. – 2014. – N 2. – P.131–135.
11. Сімейко К.В. Теплові характеристики реактору для одержання капсульованого піровуглецем кварцевого піску при проходженні процесу піролізу метану / К.В. Сімейко // Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. – 2013. – № 4. – С. 119–123.
12. Семейко К.В. Использование электротермического псевдоожигевого слоя в качестве внешнего нагревательного элемента реактора / К.В. Семейко // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2015. – № 1. – С. 58–64.
13. Семейко К.В. Исследование характеристик и свойств пироуглеродных покрытий / К.В. Семейко // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2018. – № 1. – С. 37–43.
14. Федоров С.С., Губинский М.В., Тищенко Т.А., Barsukov I. Особенности процессов нагрева углеродсодержащего сырья в электротермических печах кипящего слоя. Металлургическая и горнорудная промышленность. 2015. № 3. С. 103–107.
15. Баскаков А.П. Процессы тепло- и массопереноса в кипящем слое / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, А.Ф. Рыжков, Н.Ф. Филипповский // М., «Металлургия», 1978. 248 с.
16. Пат. 117157 Україна, МПК B01J 8/18(2006.01), B01J 8/42(2006.01), B01J 19/14(2006.01), C01B 33/021(2006.01), C01B 33/021(2006.01), C30B 25/10(2006.01), C30B 28/14(2006.01), C30B 31/12(2006.01). Реактор для високотемпературних процесів у псевдоожигеному шарі / К.В. Сімейко, Б.І. Бондаренко, О.П. Кожан, В.М. Дмитрієв; заявник і патенто-власник: Інститут газу НАН України. – № а201506499; заявл. 01.07.2015; опубл. 26.06.2017, Бюл. № 12. – 8 с.

#### ЕЛЕКТРТЕРМИЯЛЫҚ ЖАЛҒАН СҰЙЫЛТЫЛҒАН ҚАБАТ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП УРАН КАРБИДІН АЛУ ПРОЦЕСІН ЖЫЛУФИЗИКАЛЫҚ ТАЛДАУ

К.В. Семейко

*Украина УГА Газ институты, Киев, Украина*

Уран карбиді ядролық реакторлар үшін перспективалық отын түрлерінің бірі болып табылады. Уран карбидін алудың қолда бар технологиялары жоғары энергиялық шығындарымен және технологиялық қиындықтарымен сипатталады. Уран карбидін алудың энергиялық жағынан тиімді технологиясын құру өзекті міндет болып табылады. Автор электртермиялық жалған сұйылтылған қабат технологиясын пайдалана отырып уран карбидін алу мүмкіндігін ұсынады. Мақалада уран карбидін алудың екі түрі қарастырылған, олар: метан атмосферасында металл уранын қалпына келтіру және кейіннен карботермиялық қалыпқа келтіре отырып  $\text{UO}_2$ -ні пирокөміртеппен капсулалау арқылы. Жүргізілген термодинамикалық есептеулер процестерді жүргізудің оңтайлы температурасын анықтауға мүмкіндік берді. Электртермиялық жалған сұйылтылған қабаты бар реактордың схемасы ұсынылып, уран карбидін алу процесі кезінде аталған реактордағы жылу және масса алмасу мен  $\text{UO}_2$ -ге пирокөміртекті қаптаманы жағудың негізгі механизмдері сипатталды. Алынған нәтижелер бұдан кейінгі эксперименттік зерттеулер кезінде қолданылатын болады.

#### THERMOPHYSICAL ANALYSIS OF PROCESS OF URANIUM CARBIDE OBTAINING APPLYING ELECTROTHERMAL FLUIDIZED BED TECHNOLOGY

K.V. Simeiko

*The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine*

Uranium carbide is one of advanced types of nuclear reactor fuels. Existing technologies of uranium carbide obtaining possess high energy demands and technological complications. Development of energy efficient technology of uranium carbide obtaining is the relevant objective. Author of the article proposes the possibility of uranium carbide obtaining applying electrothermal fluidized bed technology. Two ways of uranium carbide obtaining are considered, the first one is reduction of uranium metal in the methane atmosphere and the second one is  $\text{UO}_2$  encapsulation with pyrocarbon and further carbothermal reduction. Thermodynamic calculations, which were carried out made it possible to determine the optimal temperature of the processes. The scheme of a reactor with an electrothermal fluidized bed was proposed and the main heat and mass transfer mechanisms in this reactor during the uranium carbide obtaining process and deposition of the pyrocarbon coating on  $\text{UO}_2$  were described. The results obtained will be used in further experimental researches.  
**Key words:** uranium carbide, pyrocarbon, carbothermal reduction, carbide nuclear fuel.

UDK 621.039.553

## EXPERIMENTAL STUDIES IN SUBSTANTIATION OF SODIUM COOLED FAST REACTORS SAFETY

<sup>1)</sup> E.G. Batyrbekov, <sup>1)</sup> M.K. Skakov, <sup>1)</sup> V.A. Vityuk, <sup>2)</sup> V.V. Baklanov,  
<sup>2)</sup> A.D. Vurim, <sup>2)</sup> A.V. Pakhnits, <sup>3)</sup> K. Kamiyama, <sup>3)</sup> K. Matsuba

<sup>1)</sup> RSE “National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan”, Kurchatov, Kazakhstan

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

<sup>3)</sup> Fast Reactor Cycle System Research and Development Center, JAEA, O-arai, Ibaraki, Japan

A large volume of scientific and research activities is currently carried out in substantiation of new projects on nuclear reactor safety, in which high emphasis is placed on “beyond-design basis” accidents, in spite of the fact that applied technical solutions reduce the probability of such accidents occurrence.

To study parameters of severe accidents and develop measures to mitigate consequences an experimental base is necessary, which enables emergency situation modelling maximally close to real conditions.

The National Nuclear Center (NNC) – the leading research organization in the atomic sphere in the Republic of Kazakhstan – possesses such an experimental base, providing scientific and technical support for peaceful uses of nuclear power, involving studies oriented towards the improvement of nuclear reactor safety [1].

The article presents the concept and general results of researches carried out on NNC’s experimental base in substantiation of nuclear reactors safety, realized in collaboration with JAEA, which is a key foreign partner in this area, as well as current plans on new experimental program implementation.

**Key words:** fast neutron reactor, severe accident, impulse graphite reactor, experimental program.

## INTRODUCTION

The leading nuclear power countries are studying six innovative next-generation nuclear systems [2], in which the major factor of their development is confidence in their safety for the population and the environment. In modern projects special attention is paid to severe accidents, in spite of the fact that these accidents are of low probability. To study parameters of severe accidents and develop measures for the mitigation of consequences an experimental base is necessary, which enables emergency situation modelling that is maximally close to real conditions. Although representative data on core behavior in severe accident conditions can be acquired during tests at research reactors, there are only several reactors in the world which provide for the required parameters and safe conditions for experiment conduction [3–6]. One of such reactors is the impulse graphite reactor (IGR) of NNC [7]. Reactor experiments, as a rule, involve tests at specially constructed non-reactor test benches and facilities.

From the beginning of the 1990s an experimental program has been carried out at the facilities of the National Nuclear Center jointly with Japanese colleagues from JAEA in support of fast sodium cooled nuclear reactor development [8, 9]. A series of in-pile and out-of-pile experiments [10, 11] were conducted, associated with the possibility of proving the controlled removal of core melt materials to safe areas inside the reactor vessel during severe accident progression. As a result, the efficiency of special-device application in core was demonstrated, providing directed (controlled) movement of melt fuel, as well as the possibility of melt movement via control rod channels. Such an approach enables a considerable reduction in the occurrence of the “recriticality” phenomenon [12, 13].

JUSTIFICATION OF EXPERIMENTAL FACILITIES  
CHOICE FOR RESEARCHES IN SUPPORT OF  
INNOVATIVE REACTOR PROJECTS

The IGR reactor (Figure 1) was put into exploitation in 1961 and as of today remains one of the best impulse research reactors in the world. Maximum density of thermal neutron flux composes  $0.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , maximum neutron fluence –  $3.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ .



Figure 1 – IGR (Impulse Graphite Reactor)

In the more than half a century of IGR operation history, a significant complex of experimental operations in the area of nuclear reactor safety has been implemented for different purposes – space, transport, power and research. Methodological and technological experience was accumulated, and new technical decisions and methodological approaches were developed to carry out reactor tests and analysis of results [14–18].

A special bench with the EAGLE facility was constructed in NNC RK designed for conducting research

in support of the construction of a new sodium cooled fast reactor, where experiments have been conducted to study different stages of severe fast reactors accidents development.

The EAGLE (Figure 2) facility provides the possibility of obtaining a melt simulator with temperatures of up to 3300 K due to working mixture induction heating, consisting of  $\text{UO}_2$ +SS or aluminum oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) in masses up to 26 kg and 15 kg correspondingly. Sodium mass in the facility – up to 140 kg.

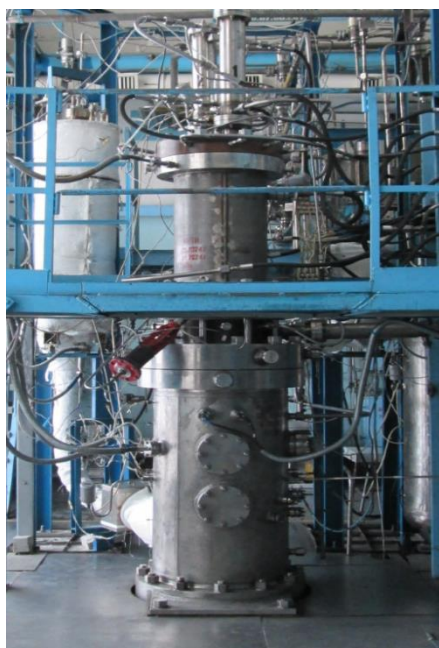


Figure 2 – EAGLE Facility

#### EXPERIMENT CONCEPT AND RESULTS

Researches, conducted at IGR and out-of-pile facilities address the necessity of constructing an extremely safe fast reactor, the design of which contains decisions which enable the exclusion of recriticality and the mitigation of severe accident consequences with core melting. Recriticality is a typical phenomenon that may occur during the production of melted fuel in pool relative to high enrichment in critical conditions of neutron

multiplication. Its occurrence may lead to a damaged reactor vessel overheating and radioactivity escaping beyond it.

The general methodology for studying melting law, core melt movement inside a fast reactor, and its interaction with elements of structural materials and coolant consists of the following: at the first stage, a number of experiments are conducted at facility on processes studied through out-of-pile modeling, resulting in the elaboration of the general testing scheme and the choice of reactor experiments conditions and parameters. At the second stage, the information, obtained during out-of-pile studies is analyzed, requirements are developed on the scheme and conditions for conducting reactor experiments, during which maximal approximation of processes to the real operation conditions of core elements at nuclear power reactors is attempted. Test modes at reactor facilities are elaborated during irradiation experiments at relatively low power of the research reactor using special mock-ups, that are practically similar upon design and material composition.

In total, eleven integral and over one hundred supporting methodological experiments will have been carried out at the IGR reactor through the implementation of the experimental program on different aspects of severe accidents study by 2020 (Figure 3).

In demonstration experiments under conditions of reactor irradiation, melting was provided as well as controlled melt movement of model fuel assemblies (FA), containing up to 8.6 kg of uranium dioxide of 17 % enrichment. Different types of FA were used depending on experimental purpose with fuel elements number from 12 to 88. In practically all experiments, sodium was used of up to 10 kg in mass.

Experimental devices are equipped for measurement using more than 100 detectors, enabling the registration of such parameters as temperature (including temperature of fuel), pressure, pressure pulse, empty space in sodium, acoustic events, and neutron flux density. Non-destructive and destructive studies are carried out after reactor tests.

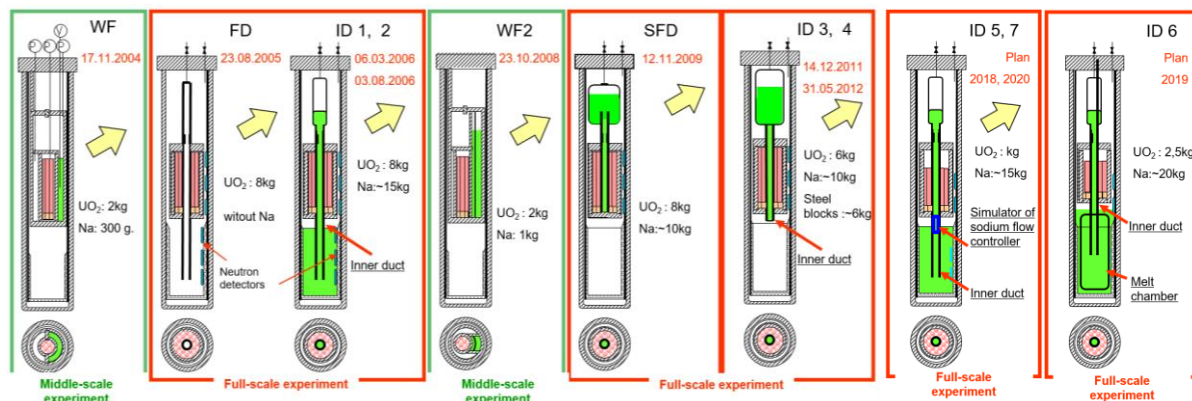


Figure 3 – Scheme of Integral Reactor Experiments

At the same time, at the non-reactor EAGLE test bench more than 50 modeling experiments using uranium dioxide and corium simulator as aluminum oxide were carried out. Processes with high temperature melt use, similar to real fuel melt upon thermophysical and hydrodynamic properties, were studied.

As a result of the conducted experiments, unique data were obtained on core structural elements disruptive parameters in severe accident conditions at fast reactors, the possibility of controlling core melt material removal via special channels was demonstrated, as well as removal via control rods guide tube towards safe areas inside the reactor vessel.

Currently, preparation for demonstration reactor experiments is being carried out, oriented to study the impact of the structural elements of the control rods guide tube on the melt movement process and the melt cooling process, removed from the core in limited volume of sodium plenum. During preparation for demonstration reactor experiments at the non-reactor EAGLE facility, a series of experiments were realized on corium simulator movement along a simulated guide tube, modeling its main structural peculiarities (Figure 4, a).  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aluminum oxide was used as corium simulator, which was melted in an electric-furnace facility and moved to melt receiving capacity. Experiments were conducted to study the efficiency of corium cooling in sodium media (Figure 4, b).



Figure 4 – Experimental Equipment for Researches: Rods Guide Tube Mock-Up (a) and Device Designed for Corium Cooling Efficiency Study (b)

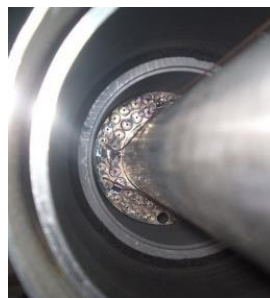
Upon research results, it was experimentally determined, that the possibility was provided to control melt materials removal from the core to safe areas inside the prospective fast reactor vessel in case of a severe core melt accident, in particular in the lower plenum. New experimental data were obtained on the cooling effects

of corium simulator that was moved to the lower plenum after sodium reflooding.

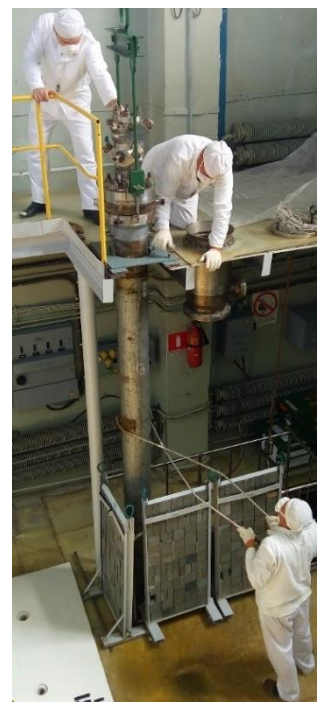
Irradiation experiments with IGR reactor devices were carried out within the experimental verification preparation based on research reactor conditions to study the possibility of core (corium) materials melt controlled movement along the control rod guide tubes (Figure 5).



Assembly of Model Fuel Elements with Uranium Dioxide Pellets



Assembly in the Case



Ready Assembly

Figure 5 – Preparation for Reactor Experiment

The results of this work allowed us to work out proposals and recommendations on measures improving the safety and efficiency of work in case of severe accidents involving fast reactors, which are defined by the nuclear community as one of the most promising areas for the further development of nuclear power systems.

The achieved results and the competences of NNC developed in the course of carrying out these experiments are currently in demand for new experimental programs preparation. For example, French Atomic Energy Commission and Alternative Energy Sources (CEA) expressed its interest in implementing a joint fuel testing program for the ASTRID Advanced Demonstration Reactor based on IGR [19].

NNC and CEA conducted preliminary studies to determine the possibility and conditions for the testing of ASTRID reactor assemblies [20, 21]. The results of the work performed showed the principal feasibility of tests' requirements. Thus, for example, during the experiment the circulation of liquid metal coolant through FA at a given flow rate will be ensured by the creation of a sodium loop. The creation of such a circuit will also significantly expand the available experimental possibilities for future research.

## CONCLUSION

The operational capabilities of the IGR reactor and the EAGLE test-bench allow the implementation of studies for obtaining of experimental information on physical and thermal processes in nuclear reactors and the behavior of fuel and core structural materials of nuclear power facilities in transient and accident modes. The results of the experiments conducted are particular-

ly important for the industrial and scientific communities. NNC and JAEA are ready to maintain and further develop cooperation in this regard.

## ACKNOWLEDGEMENT

*The authors express their gratitude to the EAGLE project staff from both NNC and JAEA for long-term fruitful work.*

## REFERENCES

1. N.A. Nazarbayev, V.S. Shkol'nik, E.G. Batyrbekov, etc. Carrying Out Scientific, Technical and Engineering Works to Bring the Former Semipalatinsk Test Site to a Safe Conditions (in 3 volumes) // RSE "National Nuclear Center of RK", Ministry of Energy RK, Kurchatov – 2016. – Volume 1 – p. 320. Volume 2 – p. 448. Volume 3 – p. 596.
2. GEN IV International Forum, "GIF R&D Outlook for Generation IV Nuclear Energy System", 21 August 2009.
3. Reactor facilities for fuel pins and FA testing in emergency and transient operation modes / V. P. Burukin, A.V. Klinov, Yu.G. Toropov // Nuclear technology abroad. – 1988. No.6. p. 7–15.
4. Overseas programs of reactor research in emergency and transient modes of NPF fuel pins operation / V. P. Burukin, A. V. Klinov, Yu.G. Toporov // Nuclear technology abroad. – 1988. No.5. p. 3–7.
5. M.N. Devisheva. Overseas research and development programs on NPP safety based on water-cooled reactors: review – M.: CSRIatominform, 1989. – p. 44.
6. Nuclear Fuel Behavior Under Reactivity-Initiated Accident (RIA) Conditions: State-of-the-art Report / Nuclear Energy Agency, OECD. – Paris, 2010. – 210 p. – ISBN 978-92-64-99113-2, NEA/CSNI/R (2010).
7. I. V. Kurchatov, S.M. Feinberg, N.A. Dollezhal. Impulse Graphite Reactor IGR. Nuclear Power. – 1964. – V. 17. – No 6. – p. 463-474.
8. Kotake S, Sakamoto Y, Mihara T, Kubo S, Uto N, Kamishima Y, Aoto K, Toda M. Development of advanced loop-type fast reactor in Japan. Nucl Technol. 2010; 170:133–147.
9. Hishida M, Kubo S, Konomura M, Toda M. Progress on the plant design concept of sodium-cooled fast reactor. J Nucl Sci Technol. 2007; 44:303–308.
10. Kubo, Sh. Et al. Main outcomes and future plan of the EAGLE project / NNC RK Bulletin, issue 1, March 2016, p. 13-18.
11. Konishi, K. et al. The Eagle project to eliminate the recriticality issue of fast reactors; Progress and results of in-pile tests / Proceedings of 5th Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS-5), Jeju, Korea Nov. 2006, pp. 465–471.
12. Kamiyama K, Saito M, Matsuba K, Isozaki M, Sato I, Konishi K, Zuyev VA, Kolodeshnikov AA, Vassiliev YS. Experimental study on fuel-discharge behavior through in-core coolant channels. J Nucl Sci Technol. 2013;50(6):629–644.
13. Kamiyama, K. et al. Experimental studies on the upward fuel discharge for elimination of severe recriticality during core-disruptive accidents in sodium-cooled fast reactors. J Nucl Sci Technol. 2014; 51(9):1114-1124.
14. A.D. Vurim, V.A. Gaidaichuk, Yu.L. Istomin, Yu.V. Aleinikov, Zh.R. Zhotabayev. Experimental studies at the IGR reactor in support of the method determining the spatial position of fuel in experimental devices under conditions simulating disruptive severe accidents and fuel melting. NNC RK Bulletin, No.4, 2010, p. 33–40.
15. A.D. Vurim, Yu.A. Popov, V.A. Vityuk, Zh.R. Zhotabayev. Investigations in support of fuel mass indirect determination technique in the central experimental channel of IGR reactor on the parameters of thermal neutrons field. NNC RK Bulletin, No. 4, 2010, p. 41–49.
16. V.A. Vityuk, A.D. Vurim, V.M. Kotov, and A.V. Pakhnits. Determination of the parameters for fuel assembly tests in a pulsed graphite reactor - Atomic Energy, Vol. 120, No. 5, September, 2016, pp. 323–327, DOI:10.1007/s10512-016-0138-3.
17. Skakov, M., Mukhamedov, N., Deryavko, I. On the issue of substantiation of test modes for ampoule experimental device in research reactor. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University-Geo Assets Engineering, vol. 328, issue 7, pp. 51–58.
18. Skakov, M., Mukhamedov, N., Deryavko, I., Wieleba, W., Vurim, A. Research of structural-phase state of natural corium in fast power reactors. Vacuum. 2017;141: 216–221.
19. The ASTRID technological demonstrator. 4th-Generation sodium-cooled fast reactors. –Tome 3, December, 2012., 96 pages.
20. F. Serre, F. Payot, C. Suteau, L. Trotignon, E. Batyrbekov, A. Vurim, A. Pakhnits, V. Vityuk, S. Kubo, A. Katoh, Y. Tobita, K. Kamiyama, K. Matsuba, J. Toyooka. R&D and Experimental Programs to support the ASTRID Core Assessment in Severe Accidents Conditions. – Proceedings of International Congress on Advances in Nuclear Power plants (ICAPP 2016), April 17-20, 2016 – San Francisco (CA, USA), Vol. 3, 2016, pp. 2173–2182.
21. F. Payot, F. Serre, A. Bassi, C. Suteau, E. Batyrbekov, A. Vurim, A. Pakhnits, V. Vityuk. The SAIGA experimental program to support the ASTRID Core Assessment in Severe Accident Conditions. – Proceedings of International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17), Yekaterinburg, June 26–29, 2017 (Paper ID IAEA-CN245-067).

## НАТРИЙ ЖЫЛУ ТАСЫҒЫШЫНДАҒЫ ШАПШАҢ НЕЙТРОНДАРДАҒЫ РЕАКТОРЛАРДЫҢ ҚАУІПСІЗДІГІНЕ ҚОЛДАУ КӨРСЕТУДЕГІ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУЛЕР

<sup>1)</sup> Э.Ғ. Батырбеков, <sup>1)</sup> М.Қ. Сқақов, <sup>1)</sup> В.А. Витюк, <sup>2)</sup> В.В. Бакланов,  
<sup>2)</sup> А.Д. Вурим, <sup>2)</sup> А.В. Пахниц, <sup>3)</sup> К. Камияма, <sup>3)</sup> К. Мацуба

<sup>1)</sup> «Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы» РМК, Курчатов, Қазақстан

<sup>2)</sup> ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

<sup>3)</sup> Шапшаң нейтрондардағы реакторлар жүйелерін зерттеу және әзірлеу орталығы,  
 Жапонияның атом энергиясы агенттігі, О-арай, Ибараки, Жапония

Қазіргі уақытта ядролық реактордың қауіпсіздігі жөніндегі жаңа жобаларды негіздеуде ғылыми-зерттеу жұмыстарының ауқымды көлемі жүргізілуде, бұл ретте қолданылатын техникалық шешімдер жобадан тыс авариялардың туындау мүмкіндігін азайтатындығына қарамастан, мұндай аварияларға ерекше көңіл бөлінеді.

Ауыр авариялардың параметрлерін зерделеу және олардың салдарын жою шараларын әзірлеу үшін авариялық жағдайды нақты жағдайға барынша жақын модельдеуге мүмкіндік беретін эксперименттік база талап етіледі.

Ұлттық ядролық орталық (ҰЯО) – ядролық энергияны бейбіт мақсатта пайдалануды ғылыми және техникалық қолдауды қамтамасыз ететін, ядролық реактордың қауіпсіздігін күшейтуге бағытталған зерттеулер жүргізетін эксперименттік базасы бар Қазақстан Республикасының атом саласындағы озық зерттеу ұйымы [1].

Бұл мақалада ядролық реакторлардың қауіпсіздігін негіздеу үшін ҰЯО-ның эксперименттік базасында аталған салада басты шетелдік әріптес болып табылатын JAЕА-мен ынтымақтастықта жүргізілетін зерттеулердің тұжырымдамасы мен негізгі нәтижелері, сондай-ақ эксперименттердің жаңа бағдарламаларын іске асыру жөніндегі ағымдағы жоспарлар ұсынылған.

**Түйінді сөздер:** шапшаң нейтрондардағы реактор, ауыр авария, импульстік графитті реактор, эксперименттік бағдарлама.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ПОДДЕРЖКУ БЕЗОПАСНОСТИ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

<sup>1)</sup> Батырбеков Э.Г., <sup>1)</sup> Скаков М.К., <sup>1)</sup> Витюк В.А., <sup>2)</sup> Бакланов В.В.,  
<sup>2)</sup> Вурим А.Д., <sup>2)</sup> Пахниц А.В., <sup>3)</sup> Камияма К., <sup>3)</sup> Мацуба К.

<sup>1)</sup> РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, Казахстан

<sup>2)</sup> Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

<sup>3)</sup> Центр исследований и разработки систем реакторов на быстрых нейтронах,  
 Японское агентство по атомной энергии, О-арай, Ибараки, Япония

В настоящее время проводится большой объем научно-исследовательских работ в обоснование новых проектов по безопасности ядерного реактора, в которых особое внимание уделяется запроектным авариям, несмотря на тот факт, что применяемые технические решения сокращают вероятность возникновения таких аварий.

Для изучения параметров тяжелой аварии и разработки мер ликвидации ее последствий требуется экспериментальная база, которая позволяет моделировать аварийную ситуацию максимально близко к реальным условиям. Национальный ядерный центр (НЯЦ) – лидирующая исследовательская организация в атомной сфере в Республике Казахстан – обладает такой экспериментальной базой, обеспечивая научную и техническую поддержку мирному использованию ядерной энергии, проводя исследования, направленные на усиление безопасности ядерного реактора [1].

В данной статье представлены концепция и основные результаты исследований, проводимых на экспериментальной базе НЯЦ в обоснование безопасности ядерных реакторов, в сотрудничестве с JAЕА (Японское агентство по атомной энергии), которое является главным иностранным партнером в данной сфере, а также текущие планы по реализации новой программы экспериментов.

**Ключевые слова:** реактор на быстрых нейтронах, тяжелая авария, импульсный графитовый реактор, экспериментальная программа.

УДК 533.9

## МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ГЕНЕРАЦИИ И ВЫДЕЛЕНИЮ ТРИТИЯ ИЗ СВИНЦОВО-ЛИТИЕВОЙ ЭВТЕКТИКИ Li15.7Pb В ПРОЦЕССЕ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Понкратов Ю.В., Тажибаева И.Л., Заурбекова Ж.А., Гордиенко Ю.Н.,  
Гныря В.С., Прозорова И.В., Мартыненко Е.А.

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

В данной статье представлена методология проведения экспериментов по генерации и выделению трития из эвтектики Li15.7Pb в условиях нейтронного облучения. В ходе разработки методологии были проведены нейтронно-физические расчеты с использованием программы MCNP, в результате которых определена удельная мощность энерговыделения в образце и элементах конструкции ампульного устройства на уровне тепловой мощности реактора 1 МВт. Также были проведены теплофизические расчеты для различных температурных режимов эвтектики на уровнях стационарной мощности реактора 1–6 МВт, расчеты были выполнены при помощи пакетов программ ANSYS. На основе проведенных расчетов было разработано и изготовлено облучательное ампульное устройство (АУ) и в последующем осуществлена очистка и заливка свинцово-литиевой эвтектики в АУ. Проведен методический реакторный эксперимент по определению параметров облучения эвтектики и определению режимов масс-спектрометрической регистрации трития в АУ и приведены его предварительные результаты.

### ВВЕДЕНИЕ

В будущих термоядерных энергетических реакторах в качестве топлива предполагается использовать изотопы водорода – дейтерий и тритий. Для наработки трития конструкция термоядерного реактора предусматривает специальное устройство – бриддерный бланкет, в котором функциональный материал в какой-либо форме содержит изотоп  ${}^6\text{Li}$ . Одной из этих форм является свинцово-литиевая эвтектика. Основными преимуществами свинцово-литиевой эвтектики среди остальных кандидатных функциональных материалов бридера являются: низкая температура плавления; высокий коэффициент воспроизводства трития; высокая теплопроводность; возможность использовать эвтектику как теплоноситель; низкая химическая активность при взаимодействии с кислородом и водой; высокая стойкость к радиационному повреждению; возможность извлечения наработанного трития за пределами бланкета.

В настоящий момент свинцово-литиевая эвтектика выбрана в качестве материала бланкета реактора ДЭМО, предназначенного для демонстрации коммерческой привлекательности термоядерной энергетики [1]. Работы в направлении создания оптимальной конструкции бланкета ДЭМО ведутся во всем мире. Прорабатывается несколько концепций Тестовых Бланкетных Модулей (ТБМ) с дальнейшим их тестированием на реакторе ИТЭР [2–7].

Существует ограниченное число работ, посвященных вопросу взаимодействия изотопов водорода со свинцово-литиевой эвтектикой. Исследования по оценке параметров диффузии, растворимости, выделения изотопов водорода, и, в частности, трития, были выполнены для свинцово-литиевой эвтектики с содержанием лития 17 % и в обычных условиях, т.е. это были эксперименты с необлученными мате-

риалами, либо эксперименты с образцами после облучения [8–10]. Однако, согласно работе [11], даже малое отклонение в концентрации лития по отношению к свинцу приводит к значительным изменениям свойств эвтектики по отношению к изотопам водорода. Было установлено, что активность лития, а значит и растворимость трития в эвтектике, резко падает при самом незначительном уменьшении содержания лития.

Именно поэтому возникает острая необходимость в проведении исследований по выделению трития из свинцово-литиевой эвтектики с содержанием лития равным 15,7 % непосредственно в условиях, моделирующих условия реальной работы в ТЯР.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

#### 1.1 Исследуемый образец

Образец свинцово-литиевой эвтектики содержит в атомных долях 15,7 % лития и 84,3 % свинца. Обогащение по изотопу  $\text{Li}^6$  составляет 7,52 % (природное). Масса исследуемого образца составляет 68,4 г.

#### 1.2 Реактор ИВГ.1М

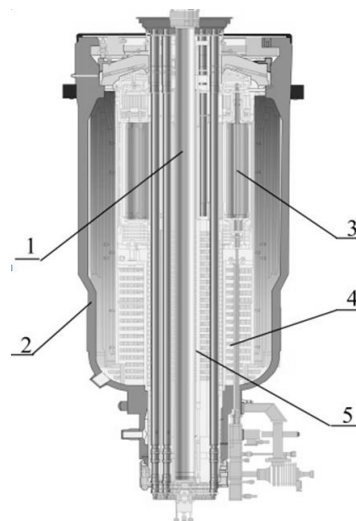
В качестве источника нейтронного облучения использовался реактор ИВГ.1М – исследовательский водо-водяной гетерогенный реактор с бериллиевым отражателем (рисунок 1). Технические характеристики и поток нейтронов реактора приведены в таблицах 1 и 2. Распределение потока нейтронов по высоте экспериментального канала реактора ИВГ.1М приведено на рисунке 2.

Таблица 1. Технические характеристики реактора ИВГ.1М

|                                             |                                           |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Тепловая мощность                           | 6 МВт                                     |
| Эффективный диаметр активной зоны           | 548 мм                                    |
| Высота активной зоны                        | 800 мм                                    |
| Количество $^{235}\text{U}$ в активной зоне | 4,6 кг                                    |
| Плотность потока тепловых нейтронов         | $0,87 \cdot 10^{14}$ н/см <sup>2</sup> ·с |
| Расход воды через реактор                   | до 68 кг/с                                |
| Максимальная температура воды               | 95 °С                                     |

Таблица 2. Поток нейтронов в центре активной зоны реактора ИВГ.1М на мощности 1 МВт

|                                          |                      |                      |                      |                      |
|------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Энергетическая группа                    | 0–0,67 эВ            | 0,67 эВ – 0,10 МэВ   | 0,10–10,00 МэВ       | Интегральный поток   |
| Нейтронный поток, 1/(см <sup>2</sup> ·с) | $0,87 \cdot 10^{14}$ | $0,42 \cdot 10^{14}$ | $0,22 \cdot 10^{14}$ | $1,50 \cdot 10^{14}$ |



1 – центральный канал; 2 – корпус реактора; 3 – регулирующий барабан (РБ); 4 – привод исполнительного механизма РБ; 5 – железо-водная защита

Рисунок 1. Реактор ИВГ.1М

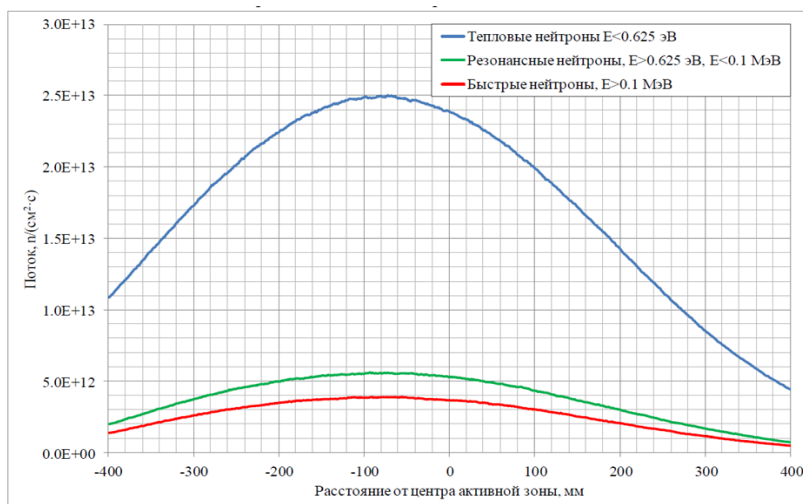


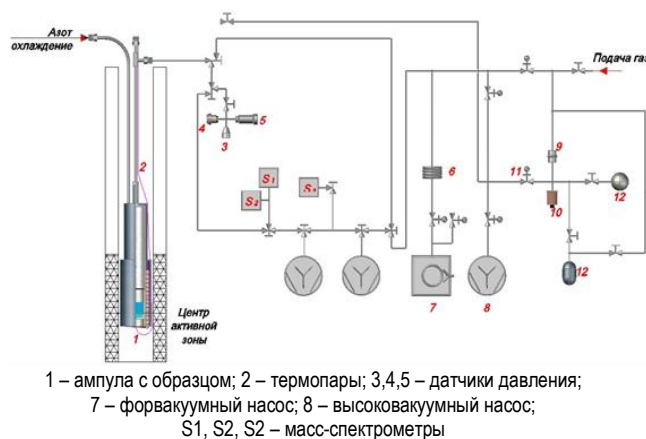
Рисунок 2. Распределение потока нейтронов по высоте экспериментального канала реактора ИВГ.1М

### 1.3 Экспериментальный стенд

Исследования проводились на экспериментальном стенде ЛИАНА (рисунок 3), который расположен в реакторном зале ИВГ.1М, и предназначен для изучения взаимодействия водорода и его изотопов с металлами, сплавами и композитными материалами, при различных уровнях нейтронного излучения, в интервале температур от 20 °С до 1000 °С.

Экспериментальный стенд функционально состоит из следующих систем:

- вакуумная система;
- масс-спектрометрический комплекс;
- автоматизированная система нагрева и регулирования температуры образца;
- информационно-измерительная система (ИИС).



1 – ампула с образцом; 2 – термодатчики; 3, 4, 5 – датчики давления; 7 – форвакуумный насос; 8 – высоковакуумный насос; S1, S2, S2 – масс-спектрометры

Рисунок 3. Схема экспериментального стенда ЛИАНА

Вакуумная система позволяет провести подготовку стенда к работе и обеспечивает все необходимые, заданные программой, условия проведения экспериментов. Система имеет две ступени откачки, форвакуумную и высоковакуумную, а также соединительные трубопроводы с запорно-регулирующей арматурой. Форвакуумная ступень оснащена вакуумным насосом НВР-5ДМ и азотной ловушкой, высоковакуумная ступень включает в себя магниторазрядные насосы НЭМ-300, НОРД-100 и НОРД-250. Форвакуумная ступень служит для предварительной откачки всех систем и обеспечивает предельно допустимый вакуум для начала работы магниторазрядных насосов. Высоковакуумная ступень создает необходимые вакуумные условия для проведения до-реакторных, реакторных и послереакторных экспериментов.

Масс-спектрометрический комплекс состоит из трех разных по типу масс-спектрометров: циклотронного газоанализатора (омегатрона) ИПДО-1, радиочастотного MX-6407 и квадрупольного RGA-100. Данный комплекс позволяет проводить измерения и регистрировать парциальные давления газов в экспериментальном ампульном устройстве в диапазоне от 1 до 100 а.е.м., а также вести непрерывный мониторинг парциальных давлений исследуемых газов в реальном времени.

Система автоматизированного нагрева и регулирования температуры выполнена на базе высокоточного регулятора температуры (ВРТ) и обеспечивает реализацию всех необходимых температурных режимов исследуемого образца с точностью  $\pm 2^\circ\text{C}$ .

Информационно-измерительная система (ИИС) обеспечивает автоматизированный сбор, регистрацию данных и наблюдение в реальном времени.

#### 1.4 Результаты теплофизических и нейтронно-физических расчетов

С использованием программы MCNP были выполнены нейтронно-физические расчеты, по результатам которых определена удельная мощность энерговыделения в образце и элементах конструкции ампульного устройства при мощности реактора 1 МВт (см. таблицу 3).

Таблица 3. Результаты расчетов энерговыделения

| Элемент конструкции         | Материал                                                       | Удельная мощность энерговыделения, Вт/см <sup>3</sup> |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Кожух охлаждения            | Сталь 12Х18Н10Т                                                | 0,98                                                  |
| Корпус ампулы               | Сталь 12Х18Н10Т                                                | 0,64                                                  |
| Перегородка                 | Сталь 12Х18Н10Т                                                | 1,048                                                 |
| Дно корпуса охлаждения      | Сталь 12Х18Н10Т                                                | 0,983                                                 |
| Свинцово-литиевая эвтектика | Li15.7Pb<br>( <sup>7</sup> Li 92,57 %, <sup>6</sup> Li 7,42 %) | 10,583<br>13,614*                                     |
| Теплоизоляция               | кремнийорганическая                                            | 0,186                                                 |

\* – наружный слой 1 мм

Распределение температуры в экспериментальной ампуле обуславливают следующие факторы: энерговыделение в материалах конструкции, конвективный теплообмен, теплообмен в материалах за счёт теплопроводности, теплообмен излучением.

При помощи программного комплекса ANSYS Fluent выполнены теплофизические расчеты облучательного устройства для различных температурных режимов эвтектики и определено температурное поле в экспериментальной ячейке на уровнях мощности реактора 1–6 МВт. Модель, построенная для расчета, приведена на рисунке 4. На основе выполненных расчетов разработана конструкция и изготовлено облучательное ампульное устройство (АУ).



Рисунок 4. Расчетная модель АУ

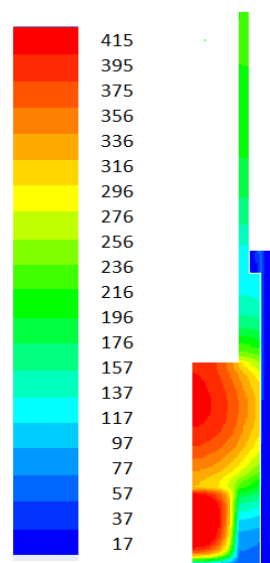


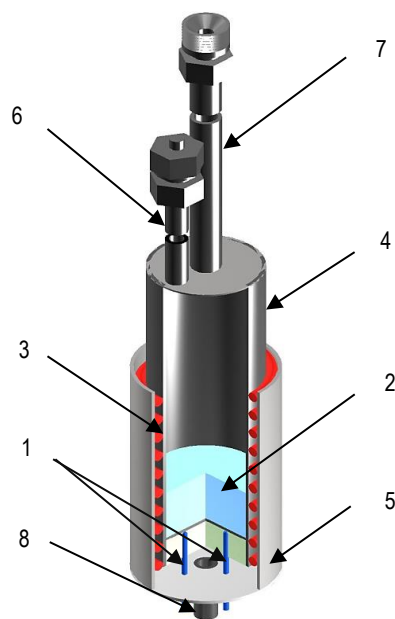
Рисунок 5. Расчетное температурное поле модели АУ на мощности реактора ИВГ.1М 6 МВт

По результатам расчетов было определено, что при стационарном режиме работы на уровне мощности работы реактора 6 МВт для обеспечения температуры корпуса ампульного устройства не выше  $300^\circ\text{C}$  расход азота охлаждения должен составлять не менее  $0,04\text{ кг/с}$ . Для того, чтобы при приведенных условиях, температура корпуса ампулы не превысила значения  $250^\circ\text{C}$  требуется расход азота, равный  $0,06\text{ кг/с}$ .

Расчетное стационарное температурное поле модели ампульного устройства при значении расхода охлаждающего газа  $0,03\text{ кг/с}$  приведено на рисунке 5. Температура приведена в градусах Цельсия.

### 1.5 Экспериментальное ампульное устройство

Для проведения реакторных экспериментов по определению параметров генерации и выделения трития из свинцово-литиевой эвтектики на основе результатов, полученных в нейтронно-физических и теплофизических расчетах, была разработана конструкция облучательного ампульного устройства (рисунк 6).



1 – термопары; 2 – свинцово-литиевая эвтектика (масса –  $68,5\text{ г}$ ); 3 – нагреватель (КТМС ХК); 4 – корпус ампулы; 5 – кожух охлаждения ( $12\text{X18H10T}$ ); 6 – штуцер соединения заливного устройства; 7 – штуцер откачки АУ и соединения с масс-спектрометрической частью; 8 – труба подачи азота

Рисунок 6. Схема ампульного устройства с образцом свинцово-литиевой эвтектики

Облучательное ампульное устройство (рисунок 6) представляет собой герметичную капсулу, изготовленную из нержавеющей стали  $12\text{X18H10T}$  с помещенным в нее образцом свинцово-литиевой эвтектики и оснащена штуцером для соединения ее с вакуумной и измерительной системами стенда ЛИАНА. Для контроля и регистрации температуры исследуемого образца и корпуса ампулы на поверхности устрой-

ства установлены две термопары типа ХА. Облучательное устройство снабжено омическим нагревателем мощностью  $200\text{ Вт}$  (изготовленного из провода КТМС ХК), который предназначен для нагрева исследуемого образца и обеспечения поддержания выбранных температурных режимов в проводимых экспериментах. Также предусмотрена система охлаждения в виде одетого на экспериментальную ячейку чехла. Охлаждение производится продуванием газообразного азота через чехол. Особенностью экспериментальной ампулы является наличие прикрепленного к ней специального контейнера, в который изначально помещалась эвтектика для проведения процедуры очистки и последующей заливки в АУ.

Заливка свинцово-литиевой эвтектики в экспериментальное ампульное устройство проводилась на специальном вакуумном стенде. Перед заливкой эвтектики в ампульное устройство были проведены процедуры ее очистки, так как получение чистой свинцово-литиевой эвтектики, удовлетворяющей определенным требованиям по примесям для использования ее в вакуумных камерах плазмо-физических установок, является важным этапом в технологии изготовления исследовательских образцов.

Способы, методики и процедуры очистки, которые частично использовались в данной работе, подробно описаны в [12].

Свинцово-литиевая эвтектика, которая применялась для изготовления образцов, изначально имела вид металлического куска с сильно окисленными поверхностями и, даже после самой тщательной очистки на поверхностях оставались следы химического взаимодействия с атмосферой воздуха. Все это приводило к попаданию в литий углерода и водорода, а взаимодействие очищенных поверхностей с кислородом и азотом так же приводило к загрязнению.

Чтобы очистить свинцово-литиевую эвтектику от примесей были использованы методы химической очистки (геттерирование) и фильтрации. Для этого в заливное устройство был помещен геттер (цирконий), связывающий растворенные в эвтектике примеси в термически более прочностные соединения, такие как нитрид циркония, гидрид циркония и т.п., не диссоциирующие в процессе нагрева эвтектики. В качестве фильтра для отделения жидкой эвтектики от крупных частиц оксидов, нитридов и карбидов использовалась мелкоячеистая сетка из нержавеющей стали.

Процедура изготовления исследуемого образца свинцово-литиевой эвтектики была следующей. Сначала эвтектика помещалась в циркониевый стакан, размещенный в герметичном контейнере из нержавеющей стали марки  $12\text{X18H10T}$  с установленным штуцером, предназначенным для откачки и последующей заливки эвтектики в АУ. Затем при помощи средств безмасляной откачки контейнер вакуумировался до давления порядка  $10^{-5}$  торр. Далее, с помощью омического нагревателя контейнер нагре-

вался до температуры  $750^\circ\text{C}$  и выдерживался в течение 2,5 часов в условиях непрерывной откачки, после чего нагреватель выключали, и эвтектика остывала до комнатной температуры, затем в контейнер напускался аргон. По завершению вышеописанных процедур контейнер подсоединялся к ампульному устройству, вся конструкция откачивалась до давления не выше  $10^{-5}$  торр и нагревалась до температуры порядка  $500^\circ\text{C}$ . Далее производилась заливка расплава свинцово-литиевой эвтектики через мелкаячеистую металлическую сетку на дно АУ.

На следующем этапе, после проведения всех необходимых технологических процедур и проверки на герметичность, облучательное ампульное устройство с образцом свинцово-литиевой эвтектики было загружено в центральный экспериментальный канал реактора ИВГ.1М (образец находился в центре активной зоны) и подсоединено к экспериментальному стенду ЛИАНА.

### 1.6 Методические реакторные эксперименты

Первоначально были проведены методические реакторные эксперименты для отработки температурных режимов и режимов регистрации трития и гелия масс-спектрометрической системой.

Для проведения методических реакторных экспериментов был выбран метод, который заключается в масс-спектрометрической регистрации изменения парциальных давлений газов над исследуемым образцом на разных мощностях реактора при различных температурах исследуемого образца.

Условия эксперимента были следующие:

- исследуемый интервал температуры образца ..... от  $150^\circ\text{C}$  до  $550^\circ\text{C}$ ;
- остаточное давление в измерительном тракте .....  $10^{-4}$  Па;
- тепловая мощность реактора ИВГ.1М ..... 6 МВт;
- интегральная плотность потока нейтронов на 6 МВт .....  $1,5 \cdot 10^{14}$  н/(см $^2$ ·с).

Охлаждение корпуса АУ осуществлялось газообразным азотом через кольцевой зазор, расход газа – от 1 г/с до 60 г/с.

Порядок проведения эксперимента был следующим:

- после загрузки ампульного устройства с исследуемым образцом в экспериментальный канал реактора ИВГ.1М образец свинцово-литиевой эвтектики был нагрет до температуры  $300^\circ\text{C}$ , при непрерывной откачке объема ампульного устройства высоковакуумным турбомолекулярным насосом, после чего образец был охлажден до комнатной температуры. Данная процедура была необходима для дегазации образца и уменьшения фоновых значений остаточных газов в объеме ампульного устройства;
- перед началом выхода реактора на заданный уровень тепловой мощности 6 МВт, была включена

масс-спектрометрическая регистрация исследуемых газов в объеме над образцом;

- далее реактор ИВГ.1М выводился на заданный стационарный уровень мощности, при этом температура образца с помощью системы охлаждения была застabilизирована на первой заданной температурной полке образца;

- после установки потоков, выделяющихся из образца газов на квазистационарном уровне (по масс-спектрометру), проводился нагрев образца до следующей заданной температуры образца;

- когда весь исследуемый температурный интервал был пройден, осуществлялся плановый сброс мощности реактора.

## 2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РЕАКТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных методических экспериментов были получены временные зависимости изменения парциальных давлений газов, в том числе гелия и трития в экспериментальном облучательном устройстве от температуры исследуемого образца свинцово-литиевой эвтектики на мощности реактора 6 МВт (рисунок 7).

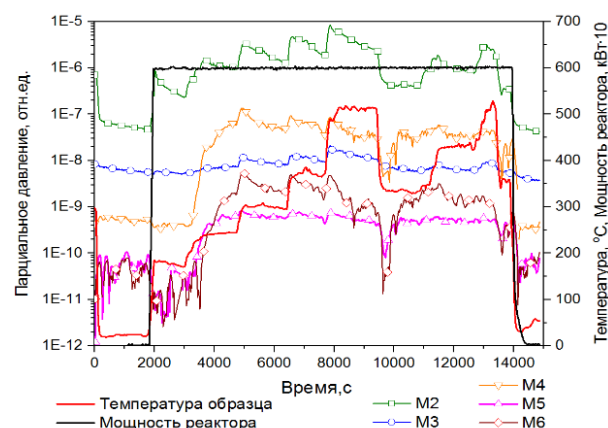


Рисунок 7. Диаграмма реакторного эксперимента с образцом  $\text{Li15.7Pb}$

Как видно из графика, практически сразу после начала реакторного эксперимента начинается рост пика, соответствующего массовому числу четыре (данный пик является суммой пиков молекул гелия и молекулы НТ), причем наблюдаемый рост происходит пропорционально мощности реактора. Также на начальном этапе облучения при температурах  $200\text{--}250^\circ\text{C}$  наблюдается выделение М6, что соответствует молекуле трития.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работ по исследованию генерации и выделения трития и гелия из свинцово-литиевой эвтектики  $\text{Li15.7Pb}$  были выполнены следующие задачи:

1. Проведены нейтронно-физические и теплофизические расчеты активной ячейки с образцом, с по-

мощью которых были определены оптимальные параметры проведения реакторных экспериментов;

2. Разработано и изготовлено экспериментальное облучательное ампульное устройство для проведения реакторных экспериментов с образцом свинцово-литиевой эвтектики, посредством которого можно также проводить очистку и заливку исследуемого образца в экспериментальную ячейку;

3. Была разработана процедура очистки и заливки эвтектики в экспериментальную ячейку;

4. Проведены методические реакторные эксперименты с образцом свинцово-литиевой эвтектики, посредством которых были определены режимы вакуумной откачки АУ и были выбраны интервалы исследуемых температур образца, определены параметры облучения эвтектики и режимы масс-спектрометрической регистрации трития в АУ.

Данные эксперименты являются первым этапом исследований по изучению процессов взаимодействия изотопов водорода со свинцово-литиевой эвтектикой в условиях реакторного облучения. В будущем планируется определить параметры выделения трития из свинцово-литиевой эвтектики Li15.7Pb в условиях реакторного облучения для различных температурных режимов; построить феноменологическую модель, описывающую особенности генерации и выделения трития из свинцово-литиевой эвтектики Li15.7Pb; определить параметры оптимальных режимов воздействия на свинцово-литиевую эвтектику, при которых достигается максимальная эффективность выделения трития.

*Работа выполнена в рамках реализации проекта грантового финансирования исследований МОН РК № AP05131677/ГФ5.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. A. Li-Puma, J. Bonnemason, L. Cachon, J.L. Duchateau, F. Gabriel. Consistent integration in preparing the helium cooled lithium lead DEMO-2007 reactor // Fusion Engineering and Design 84, 2009. P. 1197–1205.
2. Malang S. et al. An example pathway to a fusion power plant system based on lead–lithium breeder: Comparison of the dual-coolant lead–lithium (DCLL) blanket with the helium-cooled lead–lithium (HCLL) concept as initial step // Fusion Engineering and Design, 2009. V. 84. P. 2145–2157.
3. Di Maio P.A. et al. Analysis of the thermo-mechanical behaviour of the DEMO Water-Cooled Lithium Lead breeding blanket module under normal operation steady state conditions // Fusion Eng. Des. 2015. In press. ([http://dx.doi.org/10.1016.j.fusengdes.2015.03.051](http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.03.051)).
4. Sawan M.E. et al. Three-dimensional nuclear analysis for the US dual coolant lead lithium ITER test blanket module // Fusion Engineering and Design, 2010. V. 85. P. 1027–1032.
5. Sadhana Mohan, Kalyan Bhanja, K.C. Sandeep. Experimental design of tritium extraction loop from lead lithium eutectic // Fusion Engineering and Design, 85, 2010, P. 803–808.
6. V. Kapyshev, I. Danilov, I. Kartashev, V. Kovalenko, A. Leshukov, V. Poliksha, A. Razmerov, Yu. Strebkov, M. Sviridenko, E. Trusova, N. Vladimirova, A. Kalashnikov. Initial design and test of the tritium breeder monitoring system for the lead-lithium cooled ceramic breeder (LLCB) module of the ITER // Fusion Engineering and Design, 88, 2013, P. 2293–2297.
7. Yong Song, Qunying Huang, Yongliang Wang, Muyi Ni. Analysis on tritium controlling of the dual-cooled lithium lead blanket for fusion power reactor FDS-II // Fusion Engineering and Design, 84, 2009, P. 1779–1783.
8. Irina Tazhibayeva, Timur Kulsartov, Nikolay Barsukov, Yuri Gordienko, Yuri Ponkratov, Zhanna Zaurbekova, Eugeny Tulubayev, Vyachaslav Gnyrya, Viktor Baklanov, Ergazy Kenzhin. Interaction of tritium and helium with lead–lithium eutectic under reactor irradiation // Fusion Engineering and Design, 89, 2014, P. 1486–1490.
9. Takayuki Terai and Satoru Tanaka. Tritium release behavior from liquid tritium breeding materials for fusion reactor blanket under neutron irradiation. Progress in Nuclear Energy, Vol 32, No. 1/2, 1998. P. 97–112.
10. A. Li Puma, J.L. Berton, B. Branas, L. Bühler, J. Doncel. Breeding blanket design and systems integration for a helium-cooled lithium–lead fusion power plant // Fusion Engineering and Design, 81, 2006, P. 469–476.
11. S. Fukada, T. Terai, S. Konishi, K. Katayama, T. Chikada, Y. Edao, T. Muroga, M. Shimada, B. Merrill and D. K. Sze. Clarification of Tritium Behavior in Pb–Li Blanket System // Materials Transactions, Vol. 54, No. 4, 2013, P. 425–429.
12. Субботин В.Н., Арнольдов М.Н., Ивановский М.Н., Мосин А.А., Тарбов А.А. Литий. М.: Атом, 1999. 263 с.

**РЕАКТОРЛЫҚ СӘУЛЕЛЕНДІРУ ЖАҒДАЙЫНДА Li15.7Pb ҚОРҒАСЫН-ЛИТИЙ  
ЭВТЕКТИКАСЫНАН ТРИТИЙДІ АЛУ ЖӘНЕ ГЕНЕРАЦИЯ БОЙЫНША  
ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ ӘДІСТЕМЕСІ**

**Ю.В. Понкратов, И.Л. Тажибаева, Ж.А. Заурбекова, Ю.Н. Гордиенко,  
В.С. Гныря, И.В. Прозорова, Е.А. Мартыненко**

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

Нейтрон сәулелендіру жағдайында Li15.7Pb қорғасын-литий эвтектикасынан тритийді алу және генерация бойынша эксперименттік зерттеу әдістемесі ұсынылып отырған мақалада баяндалады. Әдістеме әзірлеу барысында нейтрон-физикалық есептер MCNP бағдарламасы көмегімен жүргізілді. Есептеулер нәтижесінде ИВГ1.М реакторының 1 МВт жылу қуаты деңгейінде ампулалық құрылғы конструкциясы мен элементтерінде және үлгідегі энергия бөлінуінің үлестік қуаты анықталған. Сонымен қатар эвтектикадағы ИВГ1.М реакторының 1–6 МВт стационарлық қуат деңгейіндегі түрлі температуралық режимдеріне арналған ANSYS бағдарлама пакетінің көмегімен жылуфизикалық есептеулері жүргізілді. Жүргізілген есептеулер негізінде нейтрондық сәулелендіруге арналған ампулалық құрылғы (АҚ) әзірленді. Әзірлену барысында қорғасын-литий эвтектикасын тазалау және ампулалық құрылғыға қорғасын-литий эвтектикасын құю процесі жүзеге асырылды. Эвтектикадағы сәулелену параметрлері және ампулалық құрылғыдағы тритийдің масс-спектрометриялық тіркеу режимдерін анықтау бойынша реакторлық әдістемелік эксперименттері өткізілді және эксперименттер барысындағы алдын ала нәтижелері мақалада келтірілген.

*Ұсынылып отырған мақала ҚР БҒМ № AP05131677/ГФ5 гранттық қаржыландыру жобасының жүзеге асыру бағдарламасы аясында орындалды.*

**THE METHODOLOGY OF THE EXPERIMENTS ON TRITIUM GENERATION AND RELEASE  
FROM THE Li15.7Pb LEAD LITHIUM EUTECTIC UNDER REACTOR IRRADIATION**

**Yu.V. Ponkratov, I.L. Tazhibayeva, Zh.A. Zaurbekova, Yu.N. Gordienko,  
V.S. Gnyrya, I.V. Prozorova, E.A. Martynenko**

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

In this paper, the methodology of the experiments on tritium generation and release from the Li15.7Pb lead-lithium eutectic under neutron irradiation is presented. Using the MCNP software, the neutron-physical calculations were performed. As a result of calculations, the power of energy release from the sample and from the design elements of ampoule device at the level of 1 MW thermal power are determined. Using the ANSYS software packages, thermophysical calculations for different temperature modes of eutectic at 1–6 MW stationary reactor power levels has been carried out. Based on the calculations a special irradiation ampoule device (AD) was developed. The cleaning and filling of the lead-lithium eutectic into AD were conducted. The methodical experiments to determine the irradiation parameters of eutectics and to determine the mass-spectrometric registration modes of tritium in ampoule device was performed. The preliminary results of the methodical experiments were presented.

*The work was conducted within the research grant financing by the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan No. AP05131677/GF 5.*

## СПИСОК АВТОРОВ

- Kamiyama K., 117  
Matsuba K., 117, 121  
Payot F., 93  
Serre F., 93  
Suteau C., 93  
Trotignon L., 93  
Азимханов А.С., 18  
Акаев А.С., 14, 45  
Акатан К., 103  
Аксенова Т.И., 55  
Александренко В.В., 87  
Байжан Д.Р., 99  
Бакланов В.В., 117  
Батырбеков Э.Г., 117  
Богомоллов С.Л., 87  
Бондарченко А.Е., 87  
Боргеков Д.Б., 9  
Буйткенов Д.Б., 103  
Витюк В.А., 93, 117  
Витюк Г.А., 93  
Вноровская Е.В., 5  
Вурим А.Д., 18, 50, 93, 117  
Гайдайчук В.А., 50  
Гановичев Д.А., 14, 40, 45  
Гныря В.С., 18, 122  
Гордиенко Ю.Н., 122  
Дербышев И.К., 18  
Дубровин В.И., 63  
Ермаков В.А., 33, 40  
Ермолаев Ю.В., 55  
Жагипарова Л.К., 14, 22  
Жмук Д.В., 28  
Жолдыбаев А.К., 67  
Журкин С.А., 50  
Зайнелова Г.З., 5  
Заурбекова Ж.А., 107, 122  
Здоровец М.В., 9  
Иванов И.А., 87  
Ильиных С.А., 33  
Кабдрахманова С.К., 5  
Кадыржанов К.К., 9, 83  
Калиекперов М.Е., 83  
Кенесбеков А.Б., 99  
Козин С.Г., 87  
Козловский А.Л., 9, 83  
Козловский Е.В., 50  
Колбаенков А.Н., 18  
Коровиков А.Г., 33  
Котляр А.Н., 50  
Котов В.М., 22, 93  
Кульсартов Т.В., 107  
Курахмедов А.Е., 87  
Кушербаева Н.Н., 67  
Логинов В.Н., 87  
Мартыненко Е.А., 14, 45, 122  
Медетбеков Б.С., 28  
Миллер А.А., 50  
Михайлова Н.Н., 73  
Мустафин Д.А., 87  
Нуржанов Е.Б., 18  
Олжаев И.Т., 50  
Оспанова Ж.А., 5  
Павленко А.В., 5  
Пахниц А.В., 117  
Понкратов Ю.В., 122  
Попов Ю.А., 28  
Прозорова И.В., 122  
Рахадиллов Б.К., 99, 103  
Сагдолдина Ж.Б., 99  
Самбаев Е.К., 87  
Семейко К.В., 111  
Серикбаев Б.С., 33  
Скаков М.К., 18, 117  
Смирнов А.А., 63  
Соколов И.А., 40  
Тажибаева И.Л., 122  
Троеглазова А.В., 5  
Туленбергенов Т.Р., 40  
Туркач А.А., 40  
Тусеев Т.Т., 55  
Узбеков А.Н., 73  
Хажидинов А.С., 14, 45  
Хажидинова А.Р., 45  
Хромушин И.В., 55  
Цхе В.К., 50  
Чихрай Е.В., 107  
Шлимас Д.И., 83  
Шульга М.В., 67



---

## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи предоставляются в электронном виде (на CD, DVD диске или по электронной почте присоединенным [attachment] файлом) в формате MS WORD и печатной копии.

Текст печатается на листах формата А4 (210×297 мм) с полями: сверху 30 мм; снизу 30 мм; слева 20 мм; справа 20 мм, на принтере с высоким разрешением (300-600 dpi). Горизонтальное расположение листов не допускается.

Используются шрифт Times New Roman высотой 10 пунктов для обычного текста и 12 пунктов для заголовков. Пожалуйста, для заголовков используйте стили (Заголовок 1, 2...) и не используйте их для обычного текста, таблиц и подписанных подписей.

Текст печатается через одинарный межстрочный интервал, между абзацами – один пустой абзац или интервал перед абзацем 12 пунктов.

В левом верхнем углу должен быть указан индекс УДК. Название статьи печатается ниже заглавными буквами. Через 3 интервала после названия, печатаются фамилии, имена, отчества авторов и полное наименование, город и страна местонахождения организации, которую они представляют. После этого, отступив 2 пустых абзаца или с интервалом перед абзацем 24 пункта, печатается аннотация к статье на русском языке, ключевые слова и основной текст. В конце статьи, после списка литературы, повторяются блоки «название, авторы, организации, аннотация, ключевые слова» на казахском и английском языке.

Максимально допустимый объем статьи – 10 страниц.

### При написании статей необходимо придерживаться следующих требований:

- Статья должна содержать аннотации на казахском, английском и русском языках (130-150 слов) с указанием ключевых слов, названия статьи, фамилии, имени, отчества авторов и полного названия организации, города и страны местонахождения, которую они представляют;
- Ссылки на литературные источники даются в тексте статьи цифрами в квадратных [1] скобках по мере упоминания. Список литературы следует привести по ГОСТ 7.1-2003;
- Иллюстрации (графики, схемы, диаграммы) должны быть выполнены на компьютере (ширина рисунка 8 или 14 см), либо в виде четких чертежей, выполненных тушью на белом листе формата А4. Особое внимание обратите на надписи на рисунке – они должны быть различимы при уменьшении до указанных выше размеров. На обороте рисунка проставляется его номер. В рукописном варианте на полях указывается место размещения рисунка. Рисунки должны быть представлены отдельно в одном из форматов \*.tif, \*.gif, \*.png, \*.jpg, \*.wmf с разрешением 600 dpi.
- Математические формулы в тексте должны быть набраны как объект Microsoft Equation или MathType. Химические формулы и мелкие рисунки в тексте должны быть вставлены как объекты Рисунок Microsoft Word. Следует нумеровать лишь те формулы, на которые имеются ссылки.

### К статье прилагаются следующие документы:

- 2 рецензии высококвалифицированных специалистов (докторов наук) в соответствующей отрасли науки;
- выписка из протокола заседания кафедры или методического совета с рекомендацией к печати;
- акт экспертизы (экспертное заключение);
- сведения об авторах (в бумажном и электронном виде): ФИО (полностью), наименование организации и ее полный адрес, должность, ученая степень, телефон, e-mail.

Текст должен быть тщательным образом выверен и отредактирован. В конце статья должна быть подписана автором с указанием домашнего адреса и номеров служебного и домашнего телефонов, электронной почты.

Статьи, оформление которых не соответствует указанным требованиям, к публикации не допускаются.

---

---

**Ответственный секретарь** к.ф.-м.н. В.А. Витюк  
тел. (722-51) 3-33-35, E-mail: VITYUK@NNC.KZ

**Технический редактор** И.Г. Перепелкин  
тел. (722-51) 3-33-33, E-mail: IGOR@NNC.KZ

---

**Адрес редакции:** 071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 2, зд. 054Б  
<http://old.nnc.kz/zhurnalvestnik.html>

---

© Редакция журнала «Вестник НЯЦ РК», 2018

---

**Свидетельство о постановке на учет №17039-Ж от 13.04.2018 г.**  
Выдано Комитетом информации Министерства информации и коммуникаций Республики Казахстан

---

---

Тираж 300 экз.

---

Выпуск набран и отпечатан в типографии  
**Национального ядерного центра Республики Казахстан**  
071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 2, зд. 054Б



