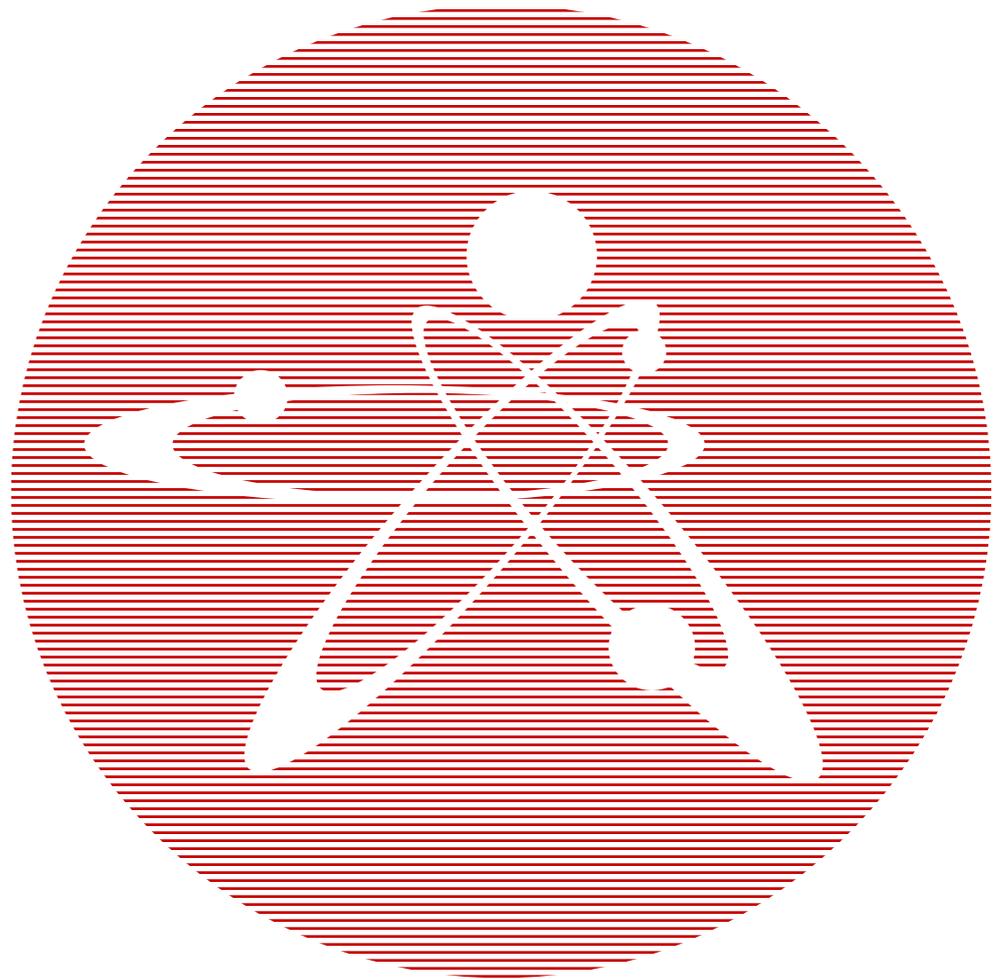


2020
ВЫПУСК 4

ISSN 1729-7516

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ВЕСТНИК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН



Вестник НЯЦ РК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 4(84), ДЕКАБРЬ 2020

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.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. ГРАДОБОЕВ А.В. (Россия), д.ф.-м.н. МАКСИМКИН О.П.,
д.ф.-м.н. МИХАЙЛОВА Н.Н., д.ф.-м.н. СОКОЛОВА И.Н., 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

4(84) ШЫҒАРЫМ, ЖЕЛТОҚСАН, 2020 ЖЫЛ

NNC RK Bulletin

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

ISSUE 4(84), DECEMBER 2020

Периодический научно-технический журнал «Вестник НЯЦ РК» входит в перечень научных изданий, рекомендуемых Комитетом по контролю в сфере образования и науки Министерства образования и науки Республики Казахстан для публикации основных результатов научной деятельности по следующим направлениям:

- **Естественные науки;**
- **Науки о Земле и географические науки.**

В журнале представлены доклады XIX конференции-конкурса НИОКР молодых ученых и специалистов РГП НЯЦ РК (Курчатов, Казахстан, 29 сентября – 01 октября 2020 г.) (стр. 47–131).

СОДЕРЖАНИЕ

НЕЙТРОННАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В МАТЕРИАЛАХ ЗАМЕДЛИТЕЛЯ Абдуллаев Х.Ш., Наджафов Б.А., Абасов Ф.П., Мамедов Б.А.	5
МОДЕРНИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА «EAGLE». ПОДСИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ Ильиных С.А., Сысалетин А.В., Ермаков В.А., Кудранова А.Б., Наурызбаев Р.Ж., Исламов Р.С.	8
МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОСТРИКЦИИ В ДОПИРОВАННОМ СПЛАВЕ FeGa Инербаев Т.М., Абуова Ф.У., Абуова А.У., Жағыпар Н., Сатанова Б.	13
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВКЛАДА ^3H В ДОЗОВУЮ НАГРУЗКУ ДЛЯ ПЕРСОНАЛА И НАСЕЛЕНИЯ ПРИ ЕГО ПОСТУПЛЕНИИ С ВОЗДУХОМ НА ТЕРРИТОРИИ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА Марченко О.О., Ляхова О.Н., Тимонова Л.В.	18
ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА, МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА И СТАБИЛЬНОСТЬ СПЛАВОВ ГЕЙСЛЕРА $\text{Mn}_2\text{Co}_{1-x}\text{V}_x\text{Z}$ ($\text{Z} = \text{Al}, \text{Ga}$) Абуова Ф.У., Инербаев Т.М., Абуова А.У., Каптагай Г.А., Мерәлі Н.А., Солтанбек Н.	24
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ДОЗИМЕТРИИ В КАЗАХСТАНЕ Бияхметова Д.Б., Кенжина Л.Б., Мамырбаева А.Н., Скаков М.К., Айдарханов А.О., Градобоев А.В.	29
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ Ni-Cr С КОМПОЗИЦИОННЫМ ПОКРЫТИЕМ Скаков М.К., Жилкашинова Ас.М., Градобоев А.В., Жилкашинова Ал.М., Абилев М.Б.	35
ARTIFICIAL RADIONUCLIDES IN THE FOREST LITTER AT THE TERRITORY ADJACENT TO SEMIPALATINSK TEST SITE Ye.S. Syssoyeva, N.V. Larionova, Yu.S. Shevchenko, N.A. Leschenko, A.I. Merkel.....	42
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЛЯ ИМИТАЦИИ ОСТАТОЧНОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В КОРИУМЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ЖАРОПРОЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ Толеубеков К.О., Акаев А.С., Бекмулдин М.К.	47
КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ СТЕНДОВОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ УПАКОВОЧНЫХ КОМПЛЕКТОВ Давыденко Д.И., Коровиков А.Г., Поспелов В.А.	53
ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННОГО РАЗОГРЕВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА С КОНВЕРТЕРОМ НЕЙТРОНОВ НА ИХ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ Сулейменов Н.А., Мухамедов Н.Е., Котов В.М.....	61
ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ УРАНА И ЦИРКОНИЯ Букина О.С., Гречаник АД., Кожаметов Е.А., Кукушкин И.М., Бакланова Ю.Ю.	69
КАРБИДИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА В ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОМ РАЗРЯДЕ Жанболатова Ғ.Қ., Бакланов В.В., Туленбергенов Т.Р., Миниязов А.Ж., Соколов И.А.	77
РАСЧЕТ ДИАГРАММЫ МОЩНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА С КОНВЕРТОРОМ НЕЙТРОНОВ Жанболатов О.М., Иркимбеков Р.А., Мухамедов Н.Е.	82

РАЗРАБОТКА ОПТИМИЗАЦИОННОЙ МОДЕЛИ В ПРОГРАММЕ ANSYS FLUENT ДЛЯ ТЕПЛООБМЕННИКА НАТРИЕВОЙ ПЕТЛИ Хасенова С.М., Акаев А.С., Мартыненко Е.А.	88
ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА СПЛАВА ЦИРКОНИЯ Э125 В ЗОНЕ ЛОКАЛЬНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ Сапатаев Е.Е., Кожакметов Е.А., Даулетханов Е.Д.	92
ОПЫТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОЖУХА НАРУЖНОГО НЕПОДВИЖНОЙ АМПУЛЫ НА-228 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ИГР Ақболатов Е.Ж., Богомоллова И.Н., Коровиков А.Г., Шевченко А.М.	99
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В ОБРАЗЦАХ БЕТОНА ИТЭР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНАА НА РЕАКТОРЕ ИВГ.1М Медетбеков Б.С., Попов Ю.А., Прозорова И.В.	105
ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЙ СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СПЛАВОВ Hf-C Тулеушев Ю.Ж., Жаканбаев Е.А., Оракова М.С., Керімше А.С., Мамырбаев А.Қ., Сарсенбаева К.Б.	113
ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ И СЕЙСМИЧНОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАЗАХСТАНА Абетов А.Е., Узбеков А.Н.	119
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УСТАНОВКИ ЖАРОПРОЧНОГО ЗАЩИТНОГО КОЖУХА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВНУТРИРЕАКТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ Кожабаяв З.Б., Иркимбеков Р.А.	127
СПИСОК АВТОРОВ	132

УДК 621.039.512.4

НЕЙТРОННАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В МАТЕРИАЛАХ ЗАМЕДЛИТЕЛЯ

¹⁾ Абдуллаев Х.Ш., ²⁾ Наджафов Б.А., ²⁾ Абасов Ф.П., ²⁾ Мамедов Б.А.

¹⁾ Бакинский Государственный Университет, Баку, Азербайджан

²⁾ Институт Радиационных Проблем НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан

E-mail: bnajafov@inbox.ru, fpabasov@mail.ru

В ходе исследования был рассмотрен приближенный метод расчета нейтронных спектров. Для этого рассчитывались релаксация нейтронов в замедлителях и различные длины релаксации. Метод предлагает рассчитать температуру нейтронного газа, длину релаксации, длину диффузии нейтронного потока, найденных экспериментально.

Процесс установления равновесного потока нейтронов в веществе называется термализацией. В безграничной однородной непоглощающей среде спектр нейтронов от импульсного источника стремится к максвелловскому. Поглощение, источники нейтронов и их утечка в конечной среде приводят к отличным от максвелловского спектрам нейтронов. Характер отклонений и законы затухания различных возмущений нейтронного потока во времени и пространстве представляют большой интерес с одной стороны для реакторной техники, а с другой — для уточнения различных моделей замедлителей. Поскольку в модели замедлителей, в частности твердых тел, исходят из определенных частотных спектров, на основе которых рассчитывается спектр нейтронов, то в этом смысле изучение спектров, а также релаксации потоков нейтронов представляет значение для физики конденсированных состояний вещества.

Изучение релаксации потока и температуры нейтронного газа обычно сводится к определению различных длин релаксаций. Дело в том, что длины релаксации определяются только свойствами среды и не зависят от вида источников. Тем самым они содержат информацию о законе рассеяния среды и, будучи извлеченными из эксперимента, могут оказаться полезными для проверки теоретических моделей ядра рассеяния.

Длинами релаксации по определению называют обратные величины дискретных собственных значений задач, возникающих при разделении переменных в кинетическом уравнении. В простейшем случае плоской геометрии, если искать решение кинетического уравнения

$$\begin{aligned} \mu \frac{\partial \varphi(z, \mu, E)}{\partial z} + \sum_t (E) \varphi(z, \mu, E) = \\ = \int_{-1}^1 \partial \mu' \int_0^\infty \sum_s (E' \rightarrow E, \mu' \rightarrow \mu) \times \varphi(z, \mu' E') dE' \end{aligned} \quad (1)$$

в виде

$$\varphi(z, \mu, E) = e^{-xz} f(\mu, E), \quad (2)$$

задача на собственные значения имеет вид

$$\begin{aligned} \left(\sum_t (E) - \mu x \right) f(E, \mu) = \\ = \int_{-1}^1 d\mu' \int_0^\infty \sum_s (E' \rightarrow E, \mu' \rightarrow \mu) f(E', \mu') dE'. \end{aligned} \quad (3)$$

Аналогичными приближениями при изотропном рассеянии являются следующие уравнения:

$$\begin{aligned} -L(E) \frac{d^2 \psi(z, E)}{dz^2} + \sum_t (E) \psi(z, E) = \\ = \int_0^\infty \sum_s (E' \rightarrow E) \psi(z, E') dE', \end{aligned} \quad (4)$$

$$\psi(z, E) = \gamma(E) e^{-xz}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \left(\sum_t (E) - D(E) x^2 \right) \gamma(E) = \\ = \int_0^\infty \sum_s (E' \rightarrow E) \gamma(E') dE'. \end{aligned} \quad (6)$$

Как видим, задачи на собственные значения (3) и (6) представляют собой задачи на собственные значения для различных интегральных уравнений, ядрами которых являются дважды дифференцированные сечения рассеяния. Спектр собственных значений [1, 2] любой реальной системы содержит непрерывную часть, но отнюдь не всегда — дискретные собственные значения. Граница между этими частями спектра лежит при

$$x^* = \min \left(\sum_t (E) \right) \quad (7)$$

для уравнения (3) и при

$$x^* = \min \left(\sqrt{3 \sum_t (E)} \right) \quad (8)$$

для уравнения (6). Таким образом, границы непрерывного спектра и весь спектр собственных значений существенно зависят от используемого приближения.

Величину $L_0 = x_0^{-1}$ (в том случае, если существует дискретное собственное значение x_0) часто называ-

ют длиной диффузии или фундаментальной длиной, соответствующей используемому приближению; $L_1 = x_1^{-1}$ (в том случае, если существует дискретное собственное значение x_1) называют первой длиной релаксации или длиной растермализации. В том случае, когда известны несколько первых длин релаксации и соответствующих им собственных функций (3), решение уравнения (1) на расстояниях $z > x^{-1}$ с хорошей точностью может быть представлено в виде суперпозиции:

$$\varphi(z, \mu, E) = \sum_{n=0}^N C_n f_n(\mu, E) e^{-x_n z}, \quad (9)$$

где x_n – дискретные собственные значения, $f_n(\mu, E)$ – соответствующие им собственные функции, $N+1$ – их число, а C_n – коэффициенты разложения.

Аналогом (9) в P_1 -приближении будет

$$\psi(z, E) = \sum_{n=0}^N C_n \gamma_n(E) e^{-x_n z}. \quad (10)$$

Отметим, что разложение (8) и (10) справедливо для полубесконечной среды, расположенной справа от источника. Обобщение на случай конечной среды производится непосредственным образом. Очевидно, что разложения (9) и (10) наиболее подходящие для задач, которые характеризуются большими размерами замедляющих зон со слабым поглощением. Многогрупповые численные методы расчета таких систем могут оказаться гораздо менее эффективными, чем указанный полуаналитический метод [3].

Теперь рассмотрим длины релаксации приближенных методов расчета. На практике пространственно-энергетическое распределение тепловых нейтронов в задачах такого класса по всей области z довольно часто ищется в виде разложения

$$\psi(z, E) = \sum_{l=1}^N \psi_l(z) x_l(E), \quad (11)$$

где $\psi(z, E)$ – скалярный поток, $\psi_l(z)$ – весовые функции, $x_l(E)$ – пробные функции, выбираемые из интуитивных соображений.

В качестве $x_l(E)$ можно использовать, например, максвелловские распределения с различными температурами или спектры в бесконечных средах.

Представление пространственно-энергетического распределения тепловых нейтронов в виде (11) лежит в основе различных мало групповых методов решения задач термализации, являющихся по сути дела вариациями метода перекрывающихся групп (МПП). Очевидным обобщением (11) для кинетического случая является

$$\varphi(z, \mu, E) = \sum_{l=1}^N \Phi_l(z, \mu) x_l(E). \quad (12)$$

Выражения (11) и (12) по форме аналогичны (10) и (9). Основное отличие (11) от (10) и (12) от (9) в том, что вместо собственных функций и собственных длин для данной среды в (11) и (12) используются какие-то другие функции и длины.

Очевидно, что когда пробные функции $x_l(E)$ плохо воспроизводят собственные функции задачи, (11) и (12) будут давать неверную асимптотику. Однако от (11) и (12) и не требуется правильной асимптотики. С их помощью делается попытка описать с равномерной точностью спектр нейтронов во всей области изменения z . Это означает, что длины релаксации этих методов не универсальны. Если в качестве пробных функций использовать максвелловское распределение с температурами зон, то в P_1 -приближении (12) преобразуется к виду

$$\psi(z, E) \approx \psi_1(z) M(E, T_1) + \psi_2(z) M(E, T_2), \quad (13)$$

а из (4) получается хорошо известная система уравнений [4, 5]:

$$\begin{aligned} D_1 \Delta \psi_1 - \left(\sum_{a_1} + \sum_R^{1 \rightarrow 2} \right) \psi_1 + \sum_R^{2 \rightarrow 1} \psi_2 &= -S_1 \\ L^2 \Delta \psi_2 - \left(\sum_{a_2} + \sum_R^{1 \rightarrow 2} \right) \psi_2 + \sum_R^{1 \rightarrow 2} \psi_1 &= -S_2, \end{aligned} \quad (14)$$

где обозначения констант соответствует принятым в работах [4, 5]. Весь спектр собственных значений однородного уравнения (14) состоит только из двух дискретных собственных значений.

Качественная структура спектра собственных значений рассмотренного приближенного метода отлична от структуры спектра собственных значений уравнений (3) и (6). Действительно, трансформируется не только граница между непрерывной и дискретной частями собственных значений, но и накладываются существенные ограничения на число дискретных собственных значений (их не может быть больше двух). кроме того, в случае P_1 -приближения непрерывная часть спектра собственных значений вообще отсутствует. Следует также отметить, что дискретные собственные значения приближенного метода зависят от вида пробных функций. Отсюда видно, что длины релаксации приближенного метода, равные обратным величинам соответствующих собственных значений, не обязаны совпадать с длинами релаксации уравнений (3) и (6).

Был предложен следующий метод вычисления L_1 . При условии существования дискретной (или хотя бы квазидискретной) первой длины релаксации L_1 векторный поток нейтронов на асимптотике может быть представлен в виде

$$\varphi(z, \mu, E) \approx C_0 f_0(\mu, E) e^{-z/P} + C_1 f_1(\mu, E) e^{-z/P_1}.$$

Тогда температура нейтронного газа будет:

$$T(z, \mu) = \frac{\int E \varphi(z, \mu, E) dE}{\int \varphi(z, \mu, E) dE} \approx \frac{\bar{E}_0(\mu) + C(\mu) \bar{E}(\mu) e^{-z/L_1}}{1 + C(\mu) e^{-z/L_2}}, \quad (15)$$

$$C(\mu) = \frac{C_1 \int f_1(\mu, E) dE}{C_0 \int f_0(\mu, E) dE},$$

$$E_n = \frac{\int E f_n(\mu, E) dE}{\int f_n(\mu, E) dE} \quad (n = 0, 1),$$

$$\frac{1}{L_2} = \frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_0}. \quad (15 \text{ a})$$

Выражение (15) может быть преобразовано к виду

$$T(z, \mu) = T_2 + (T_1 - T_2) \frac{b}{b + e^{z/L_2}}, \quad (16)$$

если ввести обозначения:

$$T_2(z) = \bar{E}_0(\mu), \quad T_1(z) = \bar{E}_1(\mu), \quad b = C(\mu).$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Nuclear Science and Engineering (NSE) No 2, vol. 159, 2008, pp.169–181.
2. Ядерные константы, № 1–2, 2010, с. 81–88.
3. Ядерные константы, № 1–2, 2008, с. 60–86.
4. Ядерная физика, Том: 79, № 4, 2015, с. 916.
5. Abdullaev H. Sh., Najafov B. A., Masimov E. A., Guseynzadeh Kh. E. Distribution of neutrons in the earth atmosphere from plane radioactive source. Mat. конф, Казахстан, 2019.

БАЯУЛАТҚЫШ МАТЕРИАЛДАРЫНДАҒЫ НЕЙТРОНДЫҚ РЕЛАКСАЦИЯ

¹⁾ Х.Ш. Абдуллаев, ²⁾ Б.А. Наджафов, ²⁾ Ф.П. Абасов, ²⁾ Б.А. Мамедов

¹⁾ *Баку Мемлекеттік университеті, Баку, Әзірбайжан*

²⁾ *Әзірбайжан Ұлттық Ғылым Академиясының Радиациялық мәселелер институты, Баку, Әзірбайжан*

Зерттеу барысында нейтрондық спектрлерді есептеудің жуық әдісі қарастырылды. Ол үшін баяулатқыштардағы нейтрондардың релаксациясы және әртүрлі релаксация ұзындығы есептелді. Бұл әдіс нейтрондық газдың температурасын, релаксация ұзындығын, эксперименттік түрде табылған нейтрон ағынының релаксация ұзындығы мен диффузия ұзындығын есептеуді ұсынады.

RELAXATION OF NEUTRONS IN SLOWING DOWN MATTERS

¹⁾ H.Sh. Abdullayev, ²⁾ B.A. Najafov, ²⁾ F.P. Abasov, ²⁾ B.A. Mamedov

¹⁾ *Baku State University, Baku, Azerbaijan*

²⁾ *Institute of Radiation Problems of the National Academy of Science of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan*

It is investigated approximate method for the calculation of the neutron spectra. It is shown the calculation of different relaxation length of the neutron in the matter. The method is given for the calculation of the relaxation length of the neutron gas temperature on the basic diffusion length and the relaxation length for neutron flow obtained from the experiment.

УДК 658.012.011.56:658.512

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА «EAGLE». ПОДСИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Ильиных С.А., Сысалетин А.В., Ермаков В.А., Кудранова А.Б., Наурызбаев Р.Ж., Исламов Р.С.

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

С начала 2020 года и по настоящее время в филиале «Институт атомной энергии» РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан» проводятся работы по модернизации подсистемы автоматического управления информационно-управляющей системы экспериментального стенда «EAGLE». В рамках этой работы было смонтировано приобретенное оборудование, произведена первичная настройка модулей и корзин расширения с помощью специализированного программного обеспечения Modbus Utility идущего в комплекте поставки. Разработаны алгоритмы для приёма и передачи данных на модули, экран управления и предоставления информации о состоянии агрегатов стендовой автоматики (АСА). В результате данной работы будет усовершенствован процесс контроля, регистрации и отображения экспериментальной информации о состоянии агрегатов экспериментального стенда «EAGLE».

Ключевые слова: информационно-управляющая система, система автоматического управления, модуль, корзина расширения, автоматизированное рабочее место.

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования в данной работе является ИУС экспериментального стенда «EAGLE», в части подсистемы автоматического управления.

Актуальность разработки проекта определяется тем, что существующая ИУС, введенная в эксплуатацию в 2002 году не в полной мере соответствует современным требованиям к качеству представляемой информации и не всегда обеспечивает полноту и точность проводимых измерений. Поэтому разработка и реализация проекта помимо улучшения системы измерений также способствует увеличению показателей надежности исследовательского стенда «EAGLE». В рамках данной работы производится модернизация подсистемы автоматического управления.

До конца 2020 года будут разработаны алгоритмы:

- срабатывание узлов АСА по заданной циклограмме с соблюдением временных интервалов и последовательности срабатывания с одновременной индикацией состояния узлов и агрегатов;
- поддержание заданного уровня давления в печи и устройстве приема расплава установки с помощью включения /отключения системы сброса газов из установки;
- автоматическое заполнение по команде оператора емкостей системы газового анализа с включением и выключением необходимых электропневмоклапанов.

В дальнейшем, в 2021 году будет произведена модернизация подсистемы контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА).

Целью работы является увеличение показателей надежности ИУС экспериментального стенда «EAGLE» за счет полной замены устаревшего оборудова-

ования и внедрения современных информационных технологий в подсистеме САУ [1].

Задачи:

- обеспечить сбор измерительной информации с периодом опроса каналов 0,1; 1; 10 с;
- предусмотреть вывод дискретных сигналов (на аппаратуру системы автоматического управления (САУ));
- обеспечить автономную регистрацию текущих значений измеряемых параметров по всем дискретным каналам с периодом регистрации на автоматизированных рабочих местах 0,1; 1; 10 с. При этом, общее время регистрации не менее 10 ч;
- предусмотреть функциональную независимость всех автоматизированных рабочих мест (АРМ) операторов и местных пультов друг от друга, при сохранении единой архитектуры ИУС;
- обеспечить гальваническую развязку между модулями САУ и агрегатами стендовой автоматики.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИУС САУ

ИУС САУ предназначена сбора и регистрации информации о состоянии АСА системы автоматического управления, а также формирования управляющих воздействий на агрегаты установки с дискретным управлением на базе микроконтроллерных средств фирмы ICP DAS.

Конструктивно ИУС САУ состоит из трехуровневого комплекса на базе корзин расширения (шасси) и модулей ввода/вывода дискретных сигналов ICP DAS серии 8000 (рисунок 1).

Функциональными задачами шасси и модулей являются:

- сбор информации о состоянии АСА;
- передача сигналов управления на АСА;
- обмен информацией с автоматизированным рабочим местом оператора ИУС САУ.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА «EAGLE».
ПОДСИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

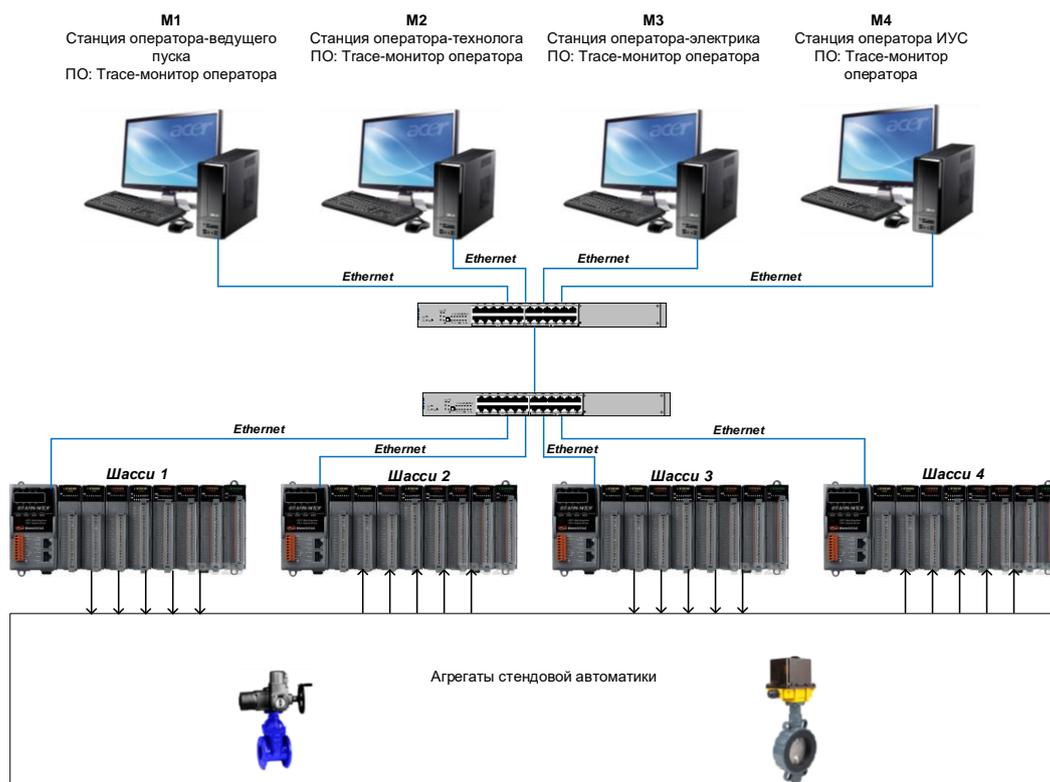


Рисунок 1. Структура ИУС САУ

Нижний уровень ИУС включает АСА. На этом уровне осуществляется согласование сигналов агрегатов стенда с входами устройств управления.

Средний уровень ИУС осуществляет функции сбора информации о состоянии АСА в реальном масштабе времени, передачу сигналов с автоматизированного рабочего места на управление исполнительными механизмами.

Верхний уровень ИУС осуществляет прием данных от модулей среднего уровня и регистрацию текущих значений состояний АСА, отображение состояния АСА в виде визуальных фрагментов на АРМ операторов, передачу команд на управление исполнительными механизмами.

В качестве оборудования среднего уровня было выбрано оборудование компании *ICP DAS*, а именно – корзины расширения *ICP DAS ET-87P8-MCTP*, модули ввода дискретных сигналов *ICP DAS I-87053W* и модули вывода дискретных сигналов *ICP DAS I-87061W* [2]. Модули устанавливаются в корзины расширения и настраиваются через программу *Modbus Utility*, посредством которой пользователь может получить доступ к настройкам и таблице *Modbus* регистров.

Взаимодействие АРМ операторов и оборудования среднего уровня происходит по сети *Ethernet* через коммутаторы *Cisco*, что позволяет в случае необходимости увеличивать количество корзин расширения и АРМ операторов.

В настоящее время произведен монтаж оборудования среднего уровня системы. На рисунке 2 показано смонтированное оборудование.



Рисунок 2. Шкаф САУ

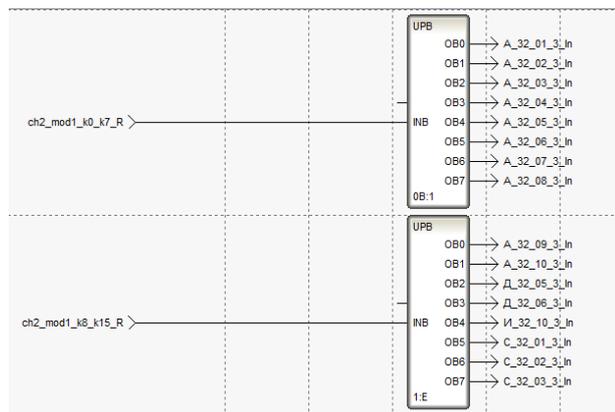


Рисунок 3. Распаковка сигналов

Подключение к модулям и разработка экрана АРМ оператора была произведена в программном обеспечении *Trace Mode 6.10* [1, 3].

Информация с модулей ввода дискретных сигналов передается в виде двух целых чисел (одно число – 1 байт – 8 бит). Каждый бит числа отвечает за состояние определенного канала. Поэтому было сделано разложение принимаемых с модулей ввода дискретных сигналов чисел на биты (преобразование десятичного числа в двоичное) и привязка получившихся составляющих к созданным ранее каналам ввода. Вид части созданного программного обеспечения в инструментальной среде *Trace Mode 6.10*,

созданного на языке *FBD* (язык функциональных блоков), показан на рисунке 3.

Все управляющие сигналы, с модулей вывода дискретных сигналов, должны иметь импульсный вид (импульс длиной в 1 секунду). Поэтому в программе было реализовано преобразование выходных сигналов в импульсный вид. По аналогии с модулями ввода, информация в модуля вывода дискретных сигналов также передается в виде двух целых (по 8 бит каждое) чисел, где каждый бит числа отвечает за состояние определенного канала. Для привязки созданных ранее каналов к модулям необходимо каждые 8 каналов объединить в одно целое (расставить по порядку, и выполнить преобразование двоичного числа в десятичное). Вид части созданного программного обеспечения выполняющий преобразование каналов в импульсный вид и их объединение показан на рисунке 4.

На рисунке 5 показана часть ПО, предназначенная для связи каналов, привязанных к графическим элементам экрана, и каналов в программе вывода дискретных сигналов. Для этой программы были созданы дополнительные функциональные блоки *YprASA*, которые принимают сигналы управления с экрана и текущее состояние АСА и после этого формируют сигнал для отправки на модули дискретного вывода. Логика работы функционального блока *YprASA* показана на рисунке 6.

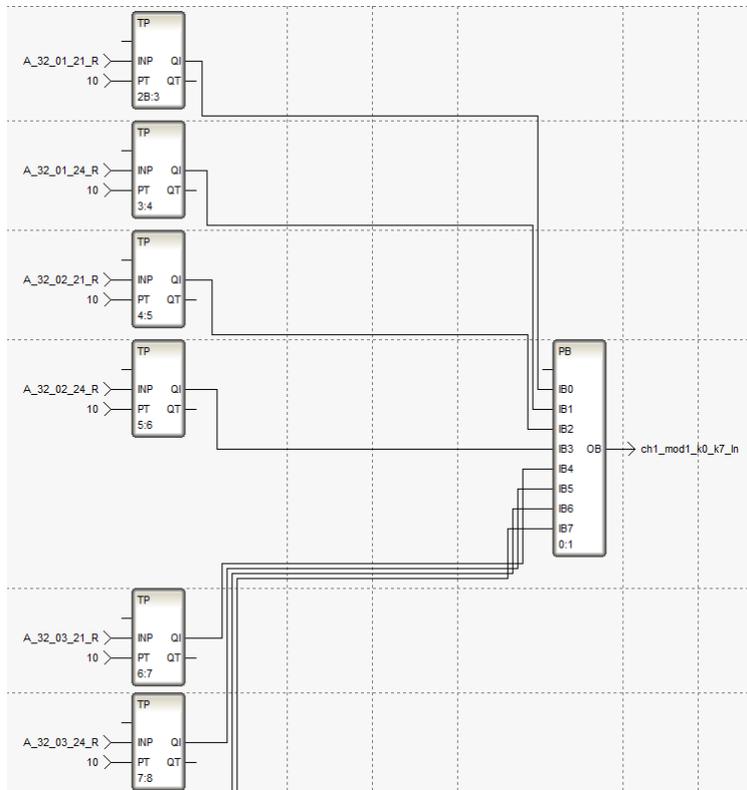


Рисунок 4. Часть ПО вывода дискретных сигналов

**МОДЕРНИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА «EAGLE».
ПОДСИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

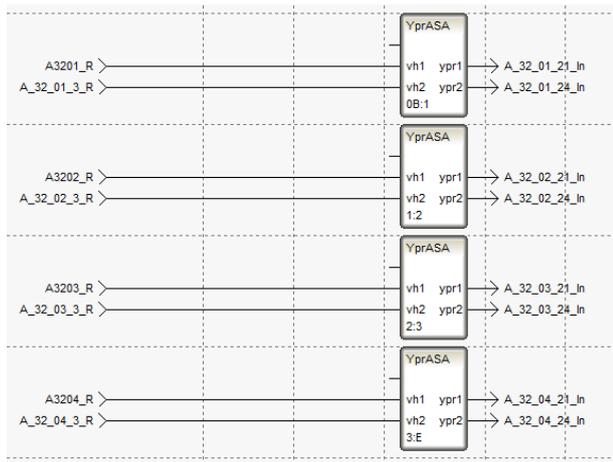


Рисунок 5. Часть ПО связи экрана с программой вывода

Для подсистемы автоматического управления была создана мнемосхема проведения пуско-наладочных работ (рисунок 7). В верхней части отображается текущие дата и время, название мнемосхемы и информационно-управляющей системы, а также расположена кнопка для перехода главный экран. На мнемосхеме расположены графические элементы, отображающие состояние агрегатов стеновой автоматики (открыт/закрыт, включен/выключен). Управление элементами АСА осуществляется посредством нажатия на соответствующий графический элемент мнемосхемы.

Регистрация данных осуществляется на АРМ, расположенных на верхнем уровне системы (рисунок 2), частота регистрации составляет 10 Гц, в случае необходимости оператор может уменьшить частоту

регистрации до 1 Гц. Все данные напрямую сохраняются в файл в виде электронных таблиц, файл EXCEL, что значительно упрощает дальнейшую работу с зарегистрированной информацией.

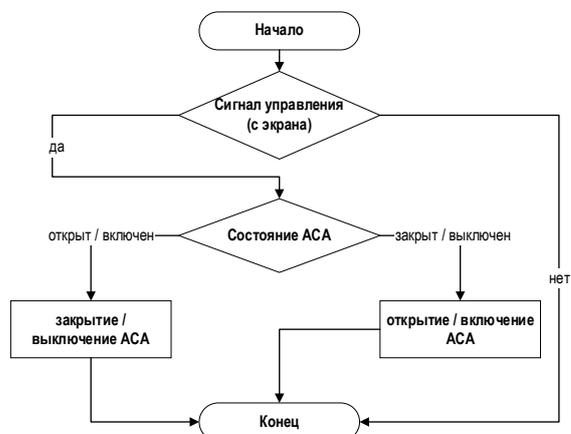


Рисунок 6. Логика работы функционального блока YprASA

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время на экспериментальном стенде «EAGLE» проводится важная и нужная работа по модернизации ИУС стенда. ИУС экспериментального стенда «EAGLE» предназначена для измерения параметров проводимых экспериментов и управления нагревателями, задвижками и другой аппаратурой стенда. В связи с моральным и физическим износом существующего оборудования ИУС, производится установка новых модулей ввода вывода, корзин расширения, АРМ и систем бесперебойного питания при неизменных АСА.

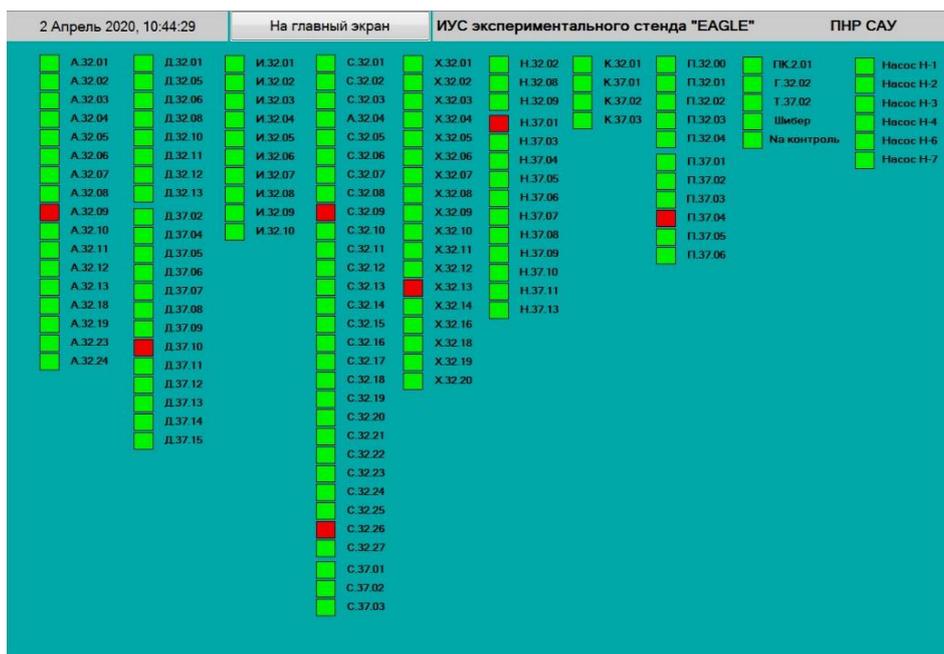


Рисунок 7. Экран ПНР ИУС САУ

В результате проделанной работы в SCADA-системе *Trace Mode 6.10* было создано программное обеспечение, которое:

- позволяет проводить опрос 176 каналов ввода дискретных сигналов от АСА;
- позволяет отправлять сигналы на 202 канала вывода дискретных сигналов для управления АСА;
- отображает информацию о состоянии АСА в виде цветовой индикации графических элементов;
- осуществляет регистрацию значений со всех каналов САУ.

Была произведена первичная настройка модулей и корзин расширения САУ. Для САУ были выбраны шестнадцать канальные модули вывода дискретных сигналов *ICP DAS I-87061W* и шестнадцатиканальные модули ввода дискретных сигналов *ICP DAS I-*

87053W, также корзины расширения *ET-87P8-MCTP*. Всего в САУ используется четыре корзины расширения, в двух из которых установлено по восемь шестнадцатиканальных модулей ввода дискретных сигналов, и в двух установлены модули вывода дискретных сигналов. Выбранное оборудование о программное обеспечение позволит в любой момент нарастить систему. За счет применения современного оборудования и программного обеспечения будут достигнуты большое быстродействие и надежность системы. Применение SCADA-системы позволит создать экраны операторов с высокими эргономическими характеристиками и большой информационной емкостью. Благодаря регистрации экспериментальных данных в цифровом виде, упрощается их обработка и дальнейшие расчеты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильиных С.А., Сысалетин А.В., Ермаков В.А., Кудранова А.Б., Наурызбаев Р.Ж., Модернизация информационно-управляющей системы экспериментального стенда «EAGLE» – Вестник НЯЦ РК, 2019 г., вып. 4, с. 38-44.
2. WinPAC-8000 User Manual (For Standard WP-8000) Version 2.0.9. – 2014 ICP DAS Co., Ltd.
3. Руководство пользователя SCADA Trace Mode 6. Том 1. 14 издание. – Москва 2011.

«EAGLE» ЭКСПЕРИМЕНТТІК СТЕНДІНІҢ АҚПАРАТТЫҚ-БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІН ЖАҢҒЫРТУ. АВТОМАТТЫ БАСҚАРУДЫҢ ІШКІ ЖҮЙЕСІ

С.А. Ильиных, А.В. Сысалетин, В.А. Ермаков, А.Б. Кудранова, Р.Ж. Наурызбаев, Р.С. Исламов

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

Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы РМК «Атом энергиясы институты» филиалында 2020 жылдың басынан бастап осы уақытқа дейін «EAGLE» эксперименттік стендінің ақпараттық-басқару жүйесінің автоматты басқарудың ішкі жүйесін жаңғырту бойынша жұмыстар жүргізілуде. Осы жұмыстың аясында жеткізілім жиынтығында бірге жүретін *Modbus Utility* мамандандырылған бағдарламалық қамтамасыз етудің көмегімен сатып алынған жабдықтар құрастырылып жөнделді, кеңейту модульдері мен қоржындарына бастапқы теңшеу жүргізілді. Модульдерге деректерді қабылдауға және жіберуге арналған алгоритмдер, стендтік автоматика агрегаттарының (САА) жай-күйі туралы ақпараттарды беру және басқару экраны әзірленді. Осы жұмыстың нәтижесінде «EAGLE» эксперименттік стенд агрегаттарының жай-күйі туралы эксперименттік ақпаратты бақылау, тіркеу және бейнелеу үдерістері жетілдірілетін болады.

Түйінді сөздер: ақпараттық басқару жүйесі, автоматты басқару жүйесі, модуль, кеңейту қоржыны, автоматтандырылған жұмыс орны.

MODERNIZATION OF INFORMATION-CONTROL SYSTEM AT EAGLE EXPERIMENTAL TEST BENCH. AUTOMATED CONTROL SUBSYSTEM

S.A. Pinykh, A.V. Sisaletin, V.A. Yermakov, A.B. Kudranova, R.Zh. Nauryzbaev, R.S. Islamov

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

The Institute of Atomic Energy (IAE) Branch of the Republican State Enterprise national Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan has been updating automated control subsystem of the information-control system at its experimental test bench EAGLE since the beginning of 2020. As part of modernization, IAE has installed new equipment and implemented primary adjustment of moduli and extension racks by means of specialized *Modbus Utility* software included in the delivery. In addition, IAE has developed algorithms to receive and transmit data onto moduli, directive screen and provide information regarding the state of test-bench automatic units. This work will result in the improvement of monitoring, recording and display of experimental information related to the state of EAGLE automated control units.

Keywords: information-control system, automatic control system, module, extension rack, computer workstation.

УДК: 29.19.21

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОСТРИКЦИИ В ДОПИРОВАННОМ СПЛАВЕ FeGa

Инербаев Т.М., Абуова Ф.У., Абуова А.У., Жагыпар Н., Сатанова Б.

*Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан**E-mail: fatika_82@mail.ru*

Электронная структура сплава FeGa теоретически исследована методами теории функционала плотности. Работа направлена на объяснение различия в изменении магнитострикционных свойств материала при использовании различных типов легирующих элементов. Интересующий эффект объясняется изменением характера химической связи между атомами железа первой и второй координационных сфер вокруг примесного атома из-за допанта. Усиление связывающей природы электронных орбиталей между этими атомами приводит к уменьшению магнитострикционного эффекта, а его ослабление – к обратному эффекту.

Ключевые слова: теория функционала плотности, сплав FeGa, легирующие элементы, магнитострикционный эффект.

ВВЕДЕНИЕ

Материалы с большой магнитострикцией широко используются в качестве датчиков магнитного поля и магнитомеханических приводов, а также для сбора энергии [1]. Важен большой (и часто также желательно линейный) отклик магнитного поля [2]. Сплав Терфенол-Д на основе редкоземельных элементов (РЗЭ) – один из самых успешных магнитострикционных материалов, демонстрирующих большие деформации, вызванные магнитным полем [3]. Но, несмотря на это, Терфенол-Д имеет ряд недостатков, таких как хрупкость и нехватка материалов, содержащих РЗЭ, которые вдохновляют междисциплинарные усилия по поиску более устойчивых, но хорошо работающих магнитострикционных материалов.

Бинарные сплавы $Fe_{1-x}Ga_x$ (галфенол) сочетают в себе многочисленные преимущества, такие как большой тетрагональный коэффициент магнитострикции, низкое магнитное поле насыщения, отличную пластичность и низкую стоимость [4–7]. Константа магнитострикции в ориентации $\langle 100 \rangle$ λ_{100} сплава Fe-Ga меньше, чем у $TbFe_2$ и терфенола-D [3, 8]. Таким образом, представляет интерес контроль магнитострикционных свойств сплава Fe-Ga.

Экспериментальные исследования $Fe_{1-x}Ga_x$ показали, что коэффициент λ_{100} в диапазоне концентраций $0 < x < 0,35$ демонстрирует двухпиковое поведение вблизи $x = 0,19$ и $x = 0,27$. Наибольшие значения магнитострикции связаны с однородными структурами A2 и $D0_3$, а резкие перепады λ_{100} связаны с сосуществованием нескольких фаз [9]. Сплавы с приблизительно 19 ат. % Ga имеют при комнатной температуре структуру либо A2, либо $D0_3$ в зависимости от скорости их охлаждения. [9–12] Также было обнаружено присутствие доменов $D0_3$, равномерно диспергированных в матрице A2. Сплавы с содержанием Ga около 27 ат. % после литья имеют структуру $D0_3$. При нагревании в сплаве $Fe_{1-x}Ga_x$ наблюдается необратимый фазовый переход первого рода из метастабильной фазы $D0_3$ в равновесную фазу $L2_1$ [9–11, 13].

Однофазный A2 сплав демонстрирует монотонный рост λ_{100} с добавлением Ga в медленно охлаждаемых или закаленных сплавах. Смесь фаз (A2 + $D0_3$) приводит к быстрому падению λ_{100} после первого максимума, а сплавы с 22,5–28 ат. % Ga являются однофазными $D0_3$ структурами, которые также демонстрируют монотонный рост с увеличением содержания Ga [9]. Дальнейшее уменьшение λ_{100} связано с образованием смеси фаз ($D0_3 + B2$). Магнитострикция фаз $D0_3$ и $L1_2$ имеет противоположный знак: положительный для $D0_3$ и отрицательный для $L1_2$ [13].

Легирование Fe-Ga третьим элементом, как известно, модифицирует магнитострикцию [14], но только недавно было показано, что следы нерастворимых РЗЭ Tb или Dy могут повышать поперечную магнитострикцию до значений, приближающихся к значениям терфенола-D. Эффект приписывают либо взаимодействию поля редкоземельного кристалла, либо его влиянию на направленное затвердевание [15–18].

Практически во всех случаях тройные добавки элементов переходных металлов снижали значения магнитострикции бинарного сплава Fe-Ga. Известно, что большинство тройных добавок стабилизируют химический порядок $D0_3$ и могут вносить основной вклад в наблюдаемое снижение магнитострикции. Изменение электронной структуры за счет добавления элементов с валентными электронами больше или меньше Fe не приводит к систематическим изменениям магнитострикции [14].

В данной работе представлены результаты первопринципного моделирования электронных свойств сплава FeGa, легированного третьим элементом. Атомы Ni (*d*-элемент) и Nd (*f*-элемент) были выбраны в качестве легирующей примеси для выяснения различных эффектов добавления элементов этого типа на магнитострикционные свойства галфенола.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Методы исследования

Первопринципные расчеты структурных и магнитных свойств систем сплава Fe-Ga были выполнены с помощью VASP (Vienna Ab-initio Simulation Package) [19, 20] с использованием подхода суперячейки. Обменно-корреляционный потенциал рассматривался с помощью приближения обобщенного градиента (GGA) в форме Пердюю-Берка-Эрзенхофа (PBE) [21]. Сетка из k точек была построена по схеме Монкхорста-Пака [23] с сеткой из $4 \times 4 \times 4$ точек. Для описания электрон-ионных взаимодействий были применены псевдопотенциалы PAW [20, 21] и задана валентно-электронная конфигурация Fe ($3s^2 3p^6 3d^7 4s^1$), Ga ($3d^{10} 4s^2 4p^1$), Ni ($3d^8 4s^2$) и Nd ($5s^2 5p^6 6s^2 5d^1 4f^3$). Значение энергии отсечки плоской волны составляет 500 эВ. Эффекты сильной корреляции, вносимые 4f-электронами Nd, были обработаны в PBE с поправкой Хаббарда U, сформулированной Дурадевым и др. [22]. Все расчеты проводились при нулевой температуре ($T = 0$ К). Пакет LOBSTER использовался для анализа взаимодействия химических связей [23–25].

Кубическая суперячейка $4 \times 4 \times 4$ (128 атомов / ячейка) использовалась для моделирования сплавов $Fe_{1-x}Ga_xM$. При выборе модельной ячейки руководствовались результатами работы [26]. С помощью моделирования неэмпирической молекулярной динамики было показано, что в сплаве Fe-Ga вероятность обнаружения атомов галлия в соседних узлах пренебрежимо мала, а их расположение в узлах решетки повторяет мотивы структуры $D0_3$ с некоторым вкладом упорядочения B2. Элементарная ячейка модели представлена на рисунке 1. Для легирования исходного сплава $Fe_{1-x}Ga_x$ был выбран один атом железа, ближайшими соседями которого также являются атомы железа. Этот атом был последовательно заменен на Ni и Nd. Мы также рассмотрели Ga как легирующую добавку, чтобы оценить влияние третьего элемента на магнитоэлектрические свойства по сравнению с простым изменением концентрации галлия.

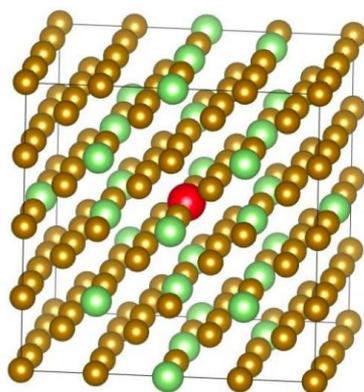


Рисунок 1. Суперячейка $4 \times 4 \times 4$, используемая для плавки сплава $Fe_{1-x}Ga_xM$. Желтые, зеленые и красные шары представляют собой атомы Fe, Ga и M соответственно

Чтобы определить коэффициент тетрагональной магнитоэлектрической деформации, модельные суперячейки были деформированы из их оптимизированной геометрии вдоль z -оси с режимом постоянного объема ($\epsilon_x = \epsilon_y = -1/2\epsilon_z$). λ_{100} была рассчитана на основе общей энергии E_{tot} , зависящей от ϵ_z , и энергии магнитокристаллической анизотропии E_{MCA} по формуле:

$$\lambda_{001} = \frac{2dE_{MCA}/d\epsilon_z}{3d^2E_{tot}/d\epsilon_z^2} = -\frac{b_1}{3c'}$$

где $b_1 = -\frac{2}{3V_0} \frac{dE_{MCA}}{d\epsilon_z}$ – константа магнитоупругой

связи и $c' = \frac{c_{11} - c_{12}}{2} = \frac{1}{3V_0} \frac{d^2E_{tot}}{d\epsilon_z^2}$ – упругий модуль тетрагонального сдвига.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В первую очередь была определена точность вычислений. Для этого были оценены значения c' , E_{MCA} и λ_{001} для всех рассмотренных структур. Полученные результаты представлены на рисунках 2 и 3.

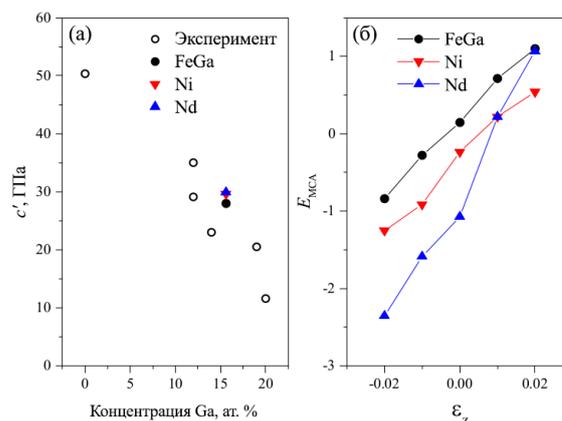


Рисунок 2. Расчетные значения модуля упругости c' для чистого сплава FeGa, легированного Ni и Nd, в сравнении с экспериментальными данными (а). Зависимая от деформации энергия магнитокристаллической анизотропии [27, 28] (б)

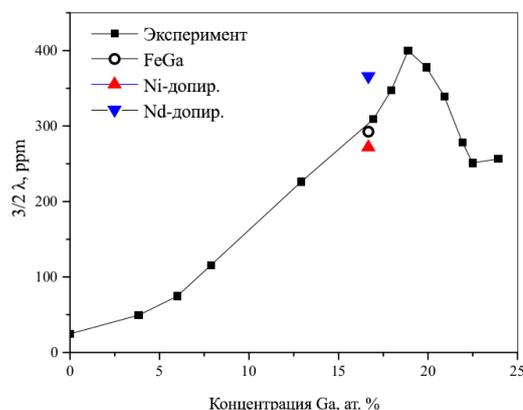


Рисунок 3. Расчетное значение $3/2 \lambda_{001}$ для рассматриваемых соединений в сравнении с экспериментальными данными для сплава $Fe_{1-x}Ga_x$ [4]

Для сплава FeGa было получено хорошее согласие между теорией и экспериментом как по модулю упругости, так и по коэффициенту магнитострикции [27, 28]. Для соединений, легированных Ni и Nd, как и ожидалось, влияние примесей приводит к минимальному изменению модулей упругости. Наклон E_{MAE} в зависимости от ε_z зависит от легирующего элемента. В результате, поскольку $dE_{MAE}/d\varepsilon_z$ для сплава, легированного Ni, уменьшается, это приводит к уменьшению значения λ_{001} , что качественно согласуется с экспериментальными результатами. В случае легирования атомами Nd значение $dE_{MAE}/d\varepsilon_z$ увеличивается, что приводит к увеличению λ_{001} . Объяснение данному эффекту будет дано ниже.

Предыдущие исследования показали, что усиление магнитострикционного эффекта в сплавах FeGa определяется увеличением количества разрыхляющих d-состояний на атомах железа для состояний со спином вниз (β -электроны). Для чистого ОЦК-железа гибридизация электронных состояний со спином вверх (α -электроны) имеет разрыхляющий характер. Напротив, гибридизация d-состояний β -электронов приводит к появлению связывающих орбиталей [29]. В сплаве FeGa присутствие атомов галлия приводит к увеличению количества разрыхляющих орбиталей, что увеличивает значение EMCA. Эти состояния имеют функции d_{xz} и d_{yz} [26, 30, 31]. Таким образом, для определения влияния допантов на магнитострикционные свойства сплава FeGa необходимо изучить изменение характера вызываемой ими гибридизации электронных состояний.

По этой причине проведен анализ населенности кристаллических орбиталей Гамильтона (СОНР). [24, 25] Согласно этому формализму, образование разрыхляющих орбиталей происходит, когда значение СОНР, взятое с противоположным знаком, становится отрицательным. Проведен соответствующий анализ для орбиталей, образованных атомами примеси и ближайшими атомами железа.

Результаты СОНР d-состояний атомов Fe примесей (f-орбитали для атомов Nd и d-орбитали для атомов Ni) представлены на рисунке 4. В результате гибридизации d-состояний атомов Ga и Fe со спином вверх образуются разрыхляющие орбитали, что и приводит к усилению магнитострикционного эффекта по сравнению с этим эффектом в железе. В то же время для данных атомов состояния со спином вниз не проявляют выраженных связывающих или разрыхляющих свойств. Данный факт объясняет уменьшение тетрагонального модуля сдвига сплава FeGa с ростом концентрации Ga, как это уже было показано на рисунке 2.

Связь d-d электронов железа и никеля со спином вверх не носят выраженного разрыхляющего или связывающего характера, тогда как состояния со спином вниз формируют связывающие состояния. Это указывает на то, что сплав никеля и железа не влияет на магнитострикционные свойства. Таким образом, расчеты показывают, что характер связи α -электронов атомов примеси с ближайшими атомами железа существенно не меняется или приводит к некоторому снижению магнитострикционного эффекта.

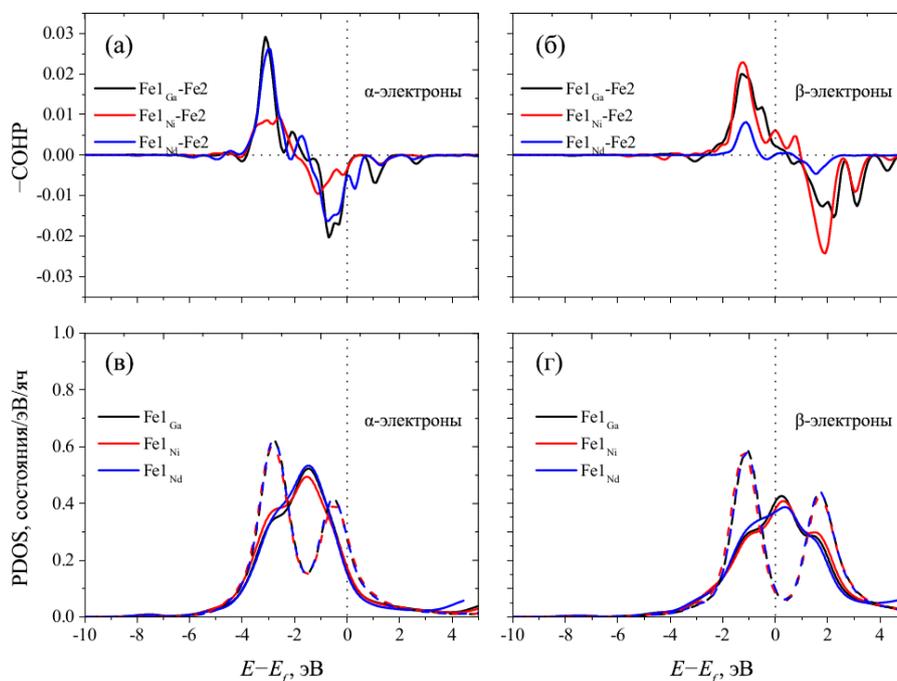


Рисунок 4. Величины СОНР для состояний со спином вверх (а) и спином вниз (б) d_{xz} и d_{yz} на Fe1 и Fe2 для соединений, допированных Ga, Ni и Nd. Соответствующие PDOS – (в) и (г)

Гибридизация орбиталей Nd и Fe (гибридизация f-d орбиталей со спином вверх) вблизи уровня везде носит ярко выраженный разрыхляющий характер. Таким образом, основной вклад в усиление магнитострикционного эффекта будет вносить усиление разрыхляющего характера связи между α -электронами атомов Fe и атома Nd. Гибридизация орбиталей Nd-Fe со спином вниз отсутствует, ввиду того, что по правилу Хунда все f-электроны имеют ориентацию спинов вверх. Данный анализ объясняет зависимость производной dE_{MAE}/dc_z от типа легирующего элемента, показанную на рисунке 2-б.

ВЫВОДЫ

В данной работе мы провели компьютерное моделирование с использованием теории функционала плотности магнитострикционных свойств Ni и Nd модифициро-

ванного сплава FeGa. Показано, что наблюдаемое экспериментально уменьшение (увеличение) коэффициента λ_{001} при добавлении легирующих примесей Ni (Nd) связано с усилением (уменьшением) разрыхляющего характера химической связи между атомами железа и легирующего атома по сравнению с ситуацией, когда для усиления магнитострикционного эффекта использовался галлий. В случае легирования атомами Nd эффект f-d-гибридизации приводит к образованию разрыхляющей связью, что усиливает магнитострикционный эффект.

Данная работа выполнена в рамках грантового проекта AP08855879 «Компьютерный дизайн эффективных магнитострикционных материалов для практических применений» на 2020–2022 гг. МОН РК.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. E. Clark and K. B. Hathaway, in A. E. Clark and K. B. Hathaway, ed. G. Engdahl, Academic, San Diego – 2000. – Vol. 1. – P. 1–48.
2. E. du Trémolet de Lacheisserie, in E. du Trémolet de Lacheisserie, ed. E. du Trémolet de Lacheisserie, D. Gignoux and M. Schlenker, Springer-Verlag, New York. – 2005. – P. 213–234.
3. F. Jerems, C. M. Mahon, A. G. Jenner and R. D. Greenough // *Ferroelectrics* – 1999. – Vol. 228. – P. 333–341.
4. J. Atulasimha and A. B. Flatau // *Smart Materials and Structures*. – 2011. – Vol. 20. – P. 043001.
5. A. E. Clark, K. B. Hathaway, M. Wun-Fogle, J. B. Restorff, T. A. Lograsso, V. M. Keppens, G. Petculescu and R. A. Taylor // *Journal of Applied Physics*. – 2003. – Vol. 93. – P. 8621–8623.
6. A. E. Clark, J. B. Restorff, M. Wun-Fogle, T. A. Lograsso and D. L. Schlagel, *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2000. – Vol. 36. – P. 3238–3240.
7. PRICM-4: Int. Symp. on Smart Materials-Fundamentals and System Applications, Pacific Rim Conf. on Advanced Materials and Processing, Honolulu, Hawaii – 2001.
8. A. E. Clark, in A. E. Clark, ed. W. E. P., Academic, North-Holland, Amsterdam. – 1980. – Vol. 1. – P. 531–589.
9. Q. Xing, Y. Du, R. McQueeney and T. Lograsso // *ActaMaterialia*. – 2008. – Vol. 56. – P. 4536–4546.
10. I. Golovin, A. Balagurov, I. Bobrikov, S. Sumnikov and A. Mohamed // *Intermetallics*. – 2019. – Vol. 114. – P. 106610.
11. M. V. Matyunina, M. A. Zagrebin, V. V. Sokolovskiy, O. O. Pavlukhina, V. D. Buchelnikov, A. M. Balagurov and I. S. Golovin // *Phase Transitions*. – 2019. – Vol. 92. – P. 101–116.
12. A. A. Emdadi, J. Cifre, O. Y. Dementeva and I. S. Golovin // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2015. – Vol. 619. – P. 58–65.
13. I. Golovin, A. Balagurov, V. Palacheva, A. Emdadi, I. Bobrikov, V. Cheverikin, A. Prosviryakov and S. Jalilzadeh // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2018. – Vol. 751. – P. 364–369.
14. Summers E. M., Lograsso T. A. and Wun-Fogle M. // *Journal of Materials Science*. – 2007. – Vol. 42. – P. 9582–9594.
15. Y. He, C. Jiang, W. Wu, B. Wang, H. Duan, H. Wang, T. Zhang, J. Wang, J. Liu, Z. Zhang, P. Stamenov, J. Coey and H. Xu // *ActaMaterialia*. – 2016. – Vol. 109. – P. 177–186.
16. V. Milyutin, I. Gervasyeva, E. Volkova, A. Alexandrov, V. Cheverikin, Y. Mansouri, V. Palacheva and I. Golovin // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2020. – Vol. 816. – P. 153283.
17. L. Zhao, X. Tian, Z. Yao, X. Zhao, R. Wang, O. Hamt, L. Jiang and V. G. Harris // *Journal of Rare Earths*. – 2020. – Vol. 38. – P. 257–264.
18. S. Fujieda, R. Ukai, Y. Onuki, S. Suzuki and T. Fukuda, *AIP Conference Proceedings*. – 2015. – Vol. 1649. – P. 27–31.
19. G. Kresse and D. Joubert // *Phys. Rev. B*. – 1999. – Vol. 59. – P. 1758–1775.
20. G. Kresse and J. Furthmüller // *Phys. Rev. B*. – 1996. – Vol. 54. – P. 11169–11186.
21. J. P. Perdew, K. Burke and M. Ernzerhof // *Phys. Rev. Lett.* – 1997. – Vol. 78. – P. 1396–1396.
22. S. L. Dudarev, G. A. Botton, S. Y. Savrasov, C. J. Humphreys and A. P. Sutton // *Phys. Rev. B*. – 1998. – Vol. 57. – P. 1505–1509.
23. R. Dronskowski and P. E. Blochl // *The Journal of Physical Chemistry*. – 1993. – Vol. 97. – P. 8617–8624.
24. V. L. Deringer, A. L. Tchougréeff and R. Dronskowski // *The Journal of Physical Chemistry A*-2011. – Vol. 115. – P. 5461–5466.
25. S. Maintz, V. L. Deringer, A. L. Tchougréeff and R. Dronskowski // *Journal of Computational Chemistry*-2016. – Vol. 37. – P. 1030–1035.
26. H. Wang, Y. N. Zhang, R. Q. Wu, L. Z. Sun, D. S. Xu and Z. D. Zhang, *Scientific Reports*. – 2013. – Vol. 3. P. 3521.
27. G. Petculescu, K. B. Hathaway, T. A. Lograsso, M. Wun-Fogle and A. E. Clark // *Journal of Applied Physics*. – 2005. – Vol. 97. – P. 302–215.
28. M. Wuttig, L. Dai and J. Cullen // *Applied Physics Letters*. – 2002. – Vol. 80. – P. 1135–1137.
29. G. A. Landrum and R. Dronskowski // *Angewandte Chemie International Edition*. – 1999. – Vol. 38. – P. 1389–1393.
30. R. Wu and A. Freeman // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 1999. – Vol. 200. – P. 498–514.
31. Y. N. Zhang, J. X. Cao and R. Q. Wu // *Applied Physics Letters*. – 2010. – Vol. 96. – P. 062508.

МАГНИТОСТРИКЦИЯНЫ FeGa ҚОСЫЛҒАН ҚҰЙМАМЕН МОДЕЛЬДЕУ

Т.М. Инербаев, Ф.У. Абуова, А.У. Абуова, Н. Жағыпар, Б. Сатанова

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

Бұл жұмыста біз Ni және Nd модификацияланған FeGa қорытпасының магнитоэластикалық қасиеттерінің тығыздықтың функционалды теориясын қолдана отырып компьютерлік модельдеу жүргіздік. Ni (Nd) допандарын қосқанда λ_{001} коэффициентінің эксперименттік түрде байқалатын төмендеуі (жоғарылауы) магнитоэластикалық әсерді күшейту үшін жағдайға қарағанда допант атомының бірінші және екінші координациялық сфераларындағы темір атомдары арасындағы химиялық байланыстың антибонды сипатының жоғарылауымен (төмендеуімен) байланысты екендігі көрсетілген. галлий қолданылды. FeGa қорытпасының электрондық құрылымы теориялық тұрғыдан тығыздықтың функционалды теориясының әдістерін қолдана отырып зерттеледі. Жұмыс легірлеуші элементтердің әртүрлі типтерін қолдану кезінде материалдың магнитоэластикалық қасиеттерінің өзгеруіндегі айырмашылықты түсіндіруге бағытталған. Қызығушылықтың әсері қоспа атомының айналасындағы бірінші және екінші координациялық сфералардың темір атомдары арасындағы химиялық байланыс сипатының допант әсерінен өзгеруімен түсіндіріледі. Осы атомдар арасындағы электрондар орбитальдарының байланыс сипатының жоғарылауы магнитоэластикалық эффекттің төмендеуіне, ал оның әлсіреуі кері әсерге әкеледі.

Түйінді сөздер: тығыздықтың функционалды теориясы, FeGa қорытпасы, легірлеуші элементтер, магнитоэластикалық эффект.

MODELING OF MAGNETOSTRICTION IN DOPED ALLOY FeGa

T.M. Inerbaev, F.U. Abuova, A.U. Abuova, N. Zhagypar, B. Satanova

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan

In this work, we have carried out computer simulation using the density functional theory of the magnetostrictive properties of Ni and Nd modified FeGa alloy. It is shown that the experimentally observed decrease (increase) in the coefficient λ_{001} upon the addition of Ni (Nd) dopants is associated with an increase (decrease) in the antibonding character of the chemical bond between iron atoms in the first and second coordination spheres of the dopant atom as compared to the situation when, to enhance the magnetostrictive effect gallium was used. The electronic structure of the FeGa alloy is theoretically investigated by the methods of density functional theory. The work is aimed at explaining the difference in the change in the magnetostrictive properties of the material when using different types of alloying elements. The effect of interest is explained by the change in the nature of the chemical bond between the iron atoms of the first and second coordination spheres around the impurity atom due to the dopant. An increase in the bonding nature of the electron orbitals between these atoms leads to a decrease in the magnetostrictive effect, and its weakening leads to the opposite effect.

Keywords: density functional theory (DFT), FeGa alloy, alloying elements, magnetostriction effect.

УДК 504.3.054:614.876:546.11.02.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВКЛАДА ^3H В ДОЗОВУЮ НАГРУЗКУ ДЛЯ ПЕРСОНАЛА И НАСЕЛЕНИЯ ПРИ ЕГО ПОСТУПЛЕНИИ С ВОЗДУХОМ НА ТЕРРИТОРИИ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Марченко О.О., Ляхова О.Н., Тимонова Л.В.

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В работе приведены данные по содержанию трития (^3H) в атмосферном воздухе в местах расположения штолен на площадке «Дегелен» Семипалатинского испытательного полигона (СИП). Зафиксировано присутствие тритированной воды (НТО) и газообразных соединений (НТ) в воздушной среде как на территории пл. «Дегелен», так и за ее пределами.

На основе полученных данных определен вклад ^3H в дозовую нагрузку для персонала и населения при поступлении с воздухом на примере площадки «Дегелен». Установлено, что вклад ^3H в дозовую нагрузку для персонала (ингаляционное поступление), при проведении работ в местах максимальной концентрации ^3H в воздухе, составит не более 1%. Вклад ^3H в дозовую нагрузку для населения, в случае ведения хозяйственной деятельности за пределами площадки «Дегелен», в местах расположения водотоков с высокой концентрацией ^3H в воде и воздухе, составит порядка 10%.

ВВЕДЕНИЕ

^3H – бета-излучатель с хорошей миграционной способностью, в силу своих физико-химических свойств, может включаться в генетические структуры любых живых организмов и оказывать на них негативное ионизирующее воздействие вследствие локального облучения бета-частицами, а также способствовать возникновению различных эффектов трансмутации. Зачастую такие изменения связаны с изменениями в химической природе атомов [1].

Радиационное воздействие ^3H на человека может являться следствием потребления продуктов питания и питьевой воды, загрязненных ^3H , а также, при вдыхании и через кожный покров [2].

Исследования [3] показали, что в организм человека, проживающего вблизи действующих ядерных энергетических установок, через органы дыхания и кожные покровы (т.е. воздушным путем) поступает до 65% ^3H и его соединений. В связи с этим, вклад поступления ^3H с воздухом необходимо учитывать при проведении оценки доз.

В ходе ранее проведенных исследований выявлено, что на территории СИП, вследствие проведения ядерных испытаний, образовались локальные участки с высоким уровнем концентрации ^3H в объектах окружающей среды. В результате различных процессов перераспределения, таких как испарение с поверхности воды, эвапотранспирация и транспирация, эманация с поверхности почвы, процессы жизнедеятельности растений и микроорганизмов ^3H поступает в атмосферный воздух.

Так как воздух является одним из основных путей поступления ^3H в организм человека, необходимо провести оценку эффективной дозы (Е) для персонала, проводящего работы в пределах тритиево-загрязненных участков на СИП, и для населения, ведущего хозяйственную деятельность на прилегающих к ним территориях.

Основные формы соединений ^3H , поступающие в воздушную среду – НТО и НТ. В связи с этим, при определении вклада ^3H в дозовую нагрузку, необходимо учитывать содержание обеих форм ^3H в воздухе.

Целью данной работы являлось определение вклада ^3H в дозовую нагрузку для персонала и населения при его поступлении с воздухом на примере площадки «Дегелен».

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование проведено на примере площадки «Дегелен», которая характеризуется максимальной концентрацией ^3H во всех объектах окружающей среды на территории СИП. В свободной воде растений, в подземных и поверхностных водах вблизи расположения штолен удельная активность ^3H составляет порядка $n \cdot 10^4$ – $n \cdot 10^5$ Бк/кг. Часть штолен имеет сезонные водотоки, которые гидрологически связаны с основными ручьями, расположенными на данной площадке и выходящими за ее пределы. Концентрация ^3H в воде ручьев, а также в компонентах природной среды их прибрежной зоны достигает десятки и сотни тысяч Бк/кг [4].

Отбор проб воздуха

Для оценки Е для персонала изучено содержание ^3H в воздухе на площадке «Дегелен». Для этого отобраны пробы атмосферного воздуха внутри площадки «Дегелен», в местах расположения штолен (в местах предполагаемого проведения полевых работ персоналом), где согласно ранее полученным результатам отмечены численные значения ^3H в атмосферном воздухе.

Отбор проб проводился на следующих участках:

– у портала штолен с водопроявлением, где согласно ранее полученным результатам отмечены высокие значения удельной активности ^3H в воде (14 штолен – 204, 802, 165, 177, 504, 176, 506, 3-1, 203, 104, 609, 503, 511, 501);

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВКЛАДА ^3H В ДОЗОВУЮ НАГРУЗКУ ДЛЯ ПЕРСОНАЛА И НАСЕЛЕНИЯ ПРИ ЕГО ПОСТУПЛЕНИИ С ВОЗДУХОМ НА ТЕРРИТОРИИ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

— над эпицентральной частью штолен без водопроявления, в местах максимального разрушения скальной породы, где возможен выход ^3H в воздушную среду через трещиноватости горной породы непосредственно из самой полости штолен (6 штолен – 505, 107, 132, 208, 185, 175).

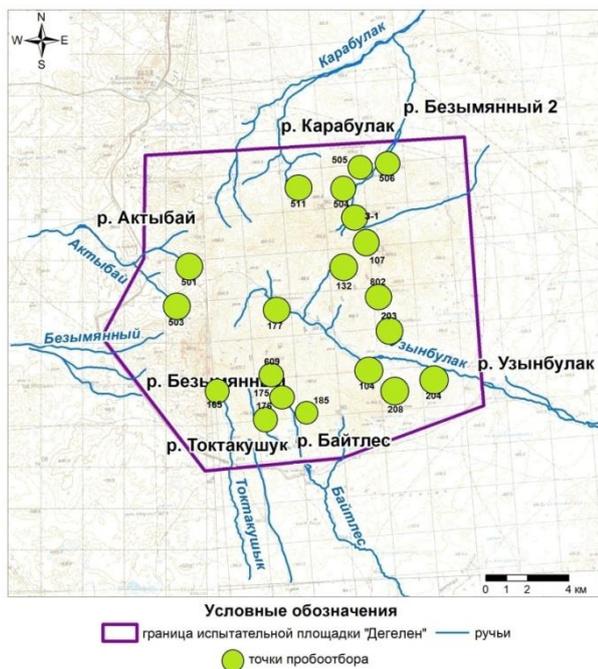


Рисунок 1. Отбор проб в местах расположения штолен

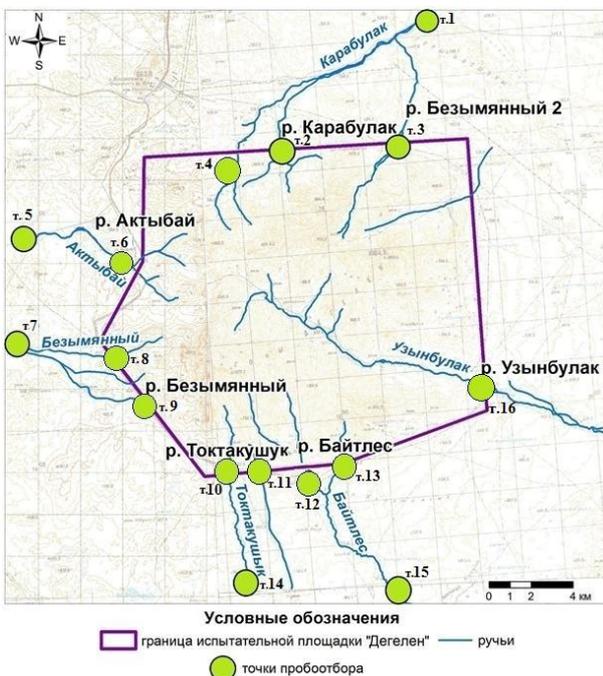


Рисунок 2. Отбор проб на границе площадки «Дегелен» и за ее пределами

Места отбора проб определялись по результатам изучения архивной информации и дополнительно в

ходе визуального осмотра на местах. Расположение обследованных штолен представлено на рисунке 1.

Для оценки E для населения пробы воздуха отобраны в русле ручьев, на участках, расположенных за границей площадки «Дегелен». Участки отбора проб выбирались на основании результатов ранее проведенных исследований, согласно которым зоны выхода ^3H за границы площадки «Дегелен» локализованы вдоль русел основных ручьев Карабулак, Узынбулак, Байтлес, Токтакушук, Актыбай, Безымянный и Безымянный-2. Удельная активность ^3H в воде ручьев варьирует в широком диапазоне значений от 20 до 250 кБк/кг. Пробы воздуха отбирались непосредственно у кромки уреза воды на участках русла в местах выхода ручьев за границу площадки «Дегелен» и на прилегающей к ней территории, где согласно многолетним наблюдениям местное население ведет хозяйственную деятельность – производит выпас скота и заготовку сена (рисунок 2).

Методы отбора и измерения проб воздуха

Отбор проб атмосферного воздуха для определения ^3H проводился при помощи коллектора трития OS1700 (рисунок 3). Данное устройство предназначено для исследования содержания газообразных соединений ^3H , которые могут быть представлены в воздухе в виде НТО и НТ.



Рисунок 3. Коллектор трития OS1700

Отобранные пробы воздуха анализировались при помощи жидкосцинтилляционного бета-радиометра SL-300 (рисунок 4), позволяющего определять ^3H в образцах на уровне 0,3 Бк/м³. Время измерения одной пробы составляло 10 часов.



Рисунок 4. Бета-радиометр SL-300

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ^3H В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

Оценка содержания ^3H в воздушной среде в пределах площадки «Дегелен»

Результаты исследования концентрации ^3H в воздушной среде в местах расположения штолен представлены на рисунке 5.

Согласно полученным результатам, на всех исследованных штольнях, за исключением шт. 501, зафиксировано присутствие ^3H в воздушной среде в двух формах НТО и НТ. Объемная активность ^3H в воздухе для НТО составила – от $<0,3$ до 230 Бк/м^3 , НТ – от $<0,3$ до $33,0 \text{ Бк/м}^3$.

Анализ всех полученных данных показал, что концентрация НТО в воздухе значительно выше в районе расположения штолен с водопроявлениями, повышенные значения НТ в воздушной среде зафиксированы над эпицентральной частью штолен без водопроявлений.

Максимальное значение объемной активности

НТО зафиксировано в районе шт. 204, в месте высокого содержания ^3H в воде. Вероятнее всего, это связано с тем, что ^3H поступает в воздух в результате испарения с поверхности воды, содержащей ^3H (рисунок 5).

Максимальное значение для НТ отмечено в месте расположения шт. 505 – 33 Бк/м^3 . Сама штольня отличается сильной разрушенностью скальных пород, поверхностных вод вблизи штольни нет, вследствие чего содержание НТО в воздухе низкое. Источником поступления НТ в воздух, предположительно, могут служить процессы, связанные с выходом газообразных радиоактивных продуктов деления из полости штолен, которые объяснить на данный момент не представляется возможным (рисунок 5).

Оценка содержания ^3H в воздушной среде на границе площадки «Дегелен» и за ее пределами

Результаты определения удельной активности ^3H в воздухе исследуемых участков представлены на рисунке 6.

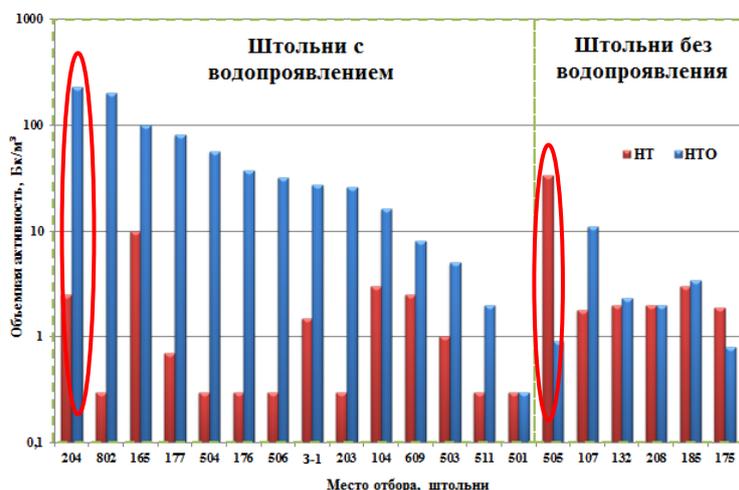


Рисунок 5. Концентрация НТО и НТ в воздухе в местах расположения штолен площадки «Дегелен»

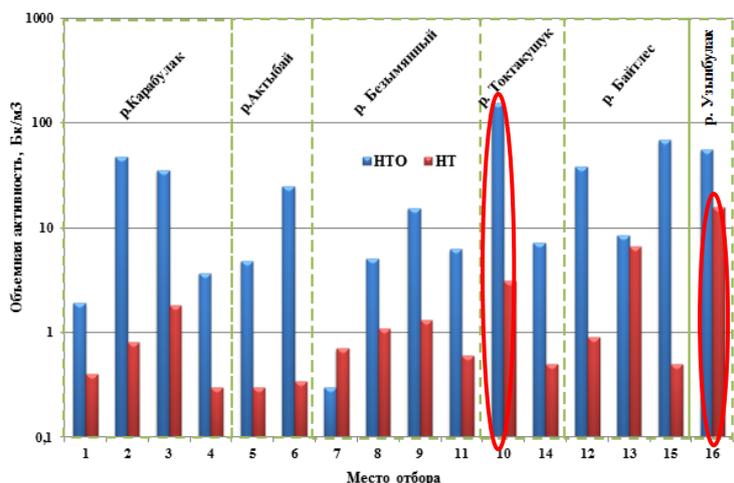


Рисунок 6. Концентрация НТО и НТ на границе площадки «Дегелен» и за ее пределами

Численные значения объемной активности НТО зафиксированы на всех участках исследования, за исключением русла р. Безымянный. Значения объемной активности НТО в воздухе изменялись в диапазоне от $<0,3$ до $154,0 \text{ Бк/м}^3$, максимальная концентрация отмечена в районе р. Токтакушук, в месте выхода русла за пределы площадки «Дегелен». Содержание НТ в воздухе изменялось от $<0,3$ до $16,0 \text{ Бк/м}^3$, максимальное содержание отмечено на границе площадки в русле р. Узынбулак.

Проведенное исследование показало присутствие НТО и НТ в воздушной среде как на территории площадки «Дегелен», так и далеко за ее пределами. Данный факт указывает на необходимость проведения контроля тритиевого загрязнения воздуха на исследуемой территории. Необходимо отметить, что значения объемной активности НТО и НТ в воздухе на всех участках исследования не превысили значения допустимой объемной активности ^3H во вдыхаемом воздухе для населения, которое составляет 1900 Бк/м^3 [5].

Полученные данные при оценке содержания ^3H в воздушной среде на площадке «Дегелен» и за ее пределами использованы для определения вклада данного радионуклида в дозовую нагрузку для персонала и населения при поступлении с воздухом.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВКЛАДА ^3H В ДОЗОВУЮ НАГРУЗКУ ПЕРСОНАЛА И НАСЕЛЕНИЯ ПРИ ПОСТУПЛЕНИИ С ВОЗДУХОМ

Характеристикой воздействия источника внутреннего облучения является величина активности соединений ^3H , поступивших в течение года в организм человека с воздухом через органы дыхания и через кожный покров. Величина этого поступления определяет величину годовой E внутреннего облучения.

Методика расчета эффективной дозы

Для расчета использованы следующие формулы [6]:

$$P_i = A_i \cdot V \cdot t \quad (1)$$

$$E_i = P_i \cdot e \quad (2)$$

$$E = \sum E_i \quad (3)$$

где: P_i – величина активности i -го соединения ^3H , поступившего в организм человека, Бк; E_i – эффективная доза от поступления в организм i -го соединения ^3H , Зв; A_i – объемная активность соединения ^3H в воздухе на рабочем месте, Бк/м^3 ; V – интенсивность воздухообмена в легких, $\text{м}^3/\text{ч}$; t – время работы, ч; e – дозовый коэффициент i -го соединения ^3H , Зв/Бк; E – суммарная эффективная доза от поступления соединений трития в организм, Зв.

Вклад в дозовую нагрузку для персонала

Для расчета E для персонала произведена консервативная оценка, при условии, что работник находится во время всего полевого сезона на данной территории в течение рабочего времени.

Использованы следующие исходные данные:

– Время облучения – 900 ч в год (с учетом работы во вредных условиях и длительности полевого се-

зона – 6 месяцев, 21 рабочий день в месяц по 7,2 часов).

– Интенсивность воздухообмена в легких – $1,4 \text{ м}^3/\text{час}$.

– Дозовый коэффициент для персонала: НТО – $1,8 \cdot 10^{-11}$ Зв/Бк, НТ – $1,8 \cdot 10^{-15}$ Зв/Бк.

При расчете E для персонала использованы максимальное и среднее значения объемной активности ^3H в воздухе на площадке «Дегелен». В результате расчетов получены следующие значения E :

$$E_{\text{макс}} = 0,005 \text{ мЗв}$$

$$E_{\text{сред}} = 0,001 \text{ мЗв}$$

Учитывая, что предел годовой E от поступления радионуклидов в организм для персонала составляет 20 мЗв за год, для населения – 1 мЗв, согласно [5], полученные значения не превышают данных нормативов. Значение $E_{\text{макс}}$, полученное при расчетах, составляет порядка 1 % от предела годовой E для персонала.

Вклад в дозовую нагрузку для населения

Для проведения оценки дозы для населения рассматривался следующий сценарий: человек находится вблизи границ площадки «Дегелен» во время выпаса скота.

При расчете E для населения использованы следующие исходные данные:

– Время облучения – 2 520 ч в год (с учетом выпаса скота 7 месяцев в году, в среднем 30 дней в месяц по 12 часов).

– Интенсивность воздухообмена в легких – $0,9 \text{ м}^3/\text{час}$.

– Дозовый коэффициент для ^3H – $2,7 \cdot 10^{-10}$ Зв/Бк.

При расчете E для населения также использованы максимальное и среднее значения объемной активности ^3H в воздухе на границе площадки «Дегелен» и за ее пределами. В результате получены следующие значения:

$$E_{\text{макс}} = 0,1 \text{ мЗв}$$

$$E_{\text{сред}} = 0,02 \text{ мЗв}$$

Установлено, что E для населения не превышает допустимых пределов доз. Но данное значение попадает в диапазон уровня исследования при локальных загрязнениях ($0,01$ – $0,3 \text{ мЗв/год}$), установленный [5]. При достижении данного уровня радиационного воздействия требуется выполнить исследование источника ионизирующего излучения с целью уточнения оценки величины годовой эффективной дозы и определения величины дозы, ожидаемой за 70 лет. В связи с этим рассчитана E , ожидаемая за 70 лет по следующей формуле (с учетом периода полураспада ^3H):

$$E_{70} = E \sum_{t=1}^{70} e^{-\frac{0,693t}{T_{1/2}}} \quad (4)$$

где: E – суммарная годовая эффективная доза от поступления соединений трития в организм, Зв; E_{70} – эффективная доза, ожидаемая за 70 лет, Зв; t – промежуток времени; $T_{1/2}$ – период полураспада ($T_{1/2}(^3\text{H})=12,3 \text{ лет}$).

В результате получены следующие значения:

$$E_{\text{макс}(70)} = 1,7 \text{ мЗв}$$

$$E_{\text{сред}(70)} = 0,3 \text{ мЗв}$$

где: $E_{\text{макс}(70)}$ – максимальное значение эффективной дозы, ожидаемой за 70 лет; $E_{\text{сред}(70)}$ – среднее значение эффективной дозы, ожидаемой за 70 лет.

Предел E от поступления радионуклидов в организм, ожидаемой за 70 лет, для населения составляет 70 мЗв, согласно [5]. Годовое значение $E_{\text{макс}}$, полученное при расчетах, составило 10% от эффективной дозы для населения за год. Значение $E_{\text{макс}(70)}$ составляет не более 3% от эффективной дозы для населения, ожидаемой за 70 лет.

Выводы

Вклад ^3H в дозовую нагрузку для персонала (ингаляционное поступление), при работе на площадке «Дегелен», где отмечены максимальные значения ^3H в воздухе на территории СИП, составил для персонала порядка 1%. Полученное значение показывает, что вклад ^3H в дозовую нагрузку персонала при поступлении его с воздухом на территории СИП является незначительным и его можно не учитывать при про-

ведении оценки доз на остальных территориях СИП.

Вклад ^3H в дозовую нагрузку для населения составляет 10%. Необходимо отметить, что значение E для населения (0,1 мЗв) попадает в диапазон уровня исследования при локальных загрязнениях (0,01–0,3 мЗв/год). При достижении данного уровня радиационного воздействия требуется выполнить исследование источника ионизирующего излучения с целью уточнения оценки величины годовой эффективной дозы и определения величины дозы, ожидаемой за 70 лет. В связи с этим рассчитана E , ожидаемая за 70 лет.

Годовое значение $E_{\text{макс}}$, полученное при расчетах, составило 10% от эффективной дозы для населения за год. Значение $E_{\text{макс}(70)}$ составляет не более 3% от эффективной дозы для населения, ожидаемой за 70 лет.

Проведенное исследование показало, что значения объемной активности НТО и НТ в воздухе на всех участках исследования не превысили значения допустимой объемной активности ^3H во вдыхаемом воздухе для населения, которое составляет 1900 Бк/м³.

ЛИТЕРАТУРА

1. Разработка современных методов определения содержания некоторых дозообразующих радионуклидов (^{14}C , ^{151}Sm , ^3H , ^{99}Tc) в объектах окружающей среды, технологических продуктах, выбросах и сбросах объектов ядерно-энергетической отрасли: отчет о НИР (промежут.) : 055 / Институт радиационной безопасности и экологии; рук. Лукашенко С. Н.; исполн.: Ляхова О. Н., Самойлов И. В. [и др.] – Курчатов, 2013. – 56 с. – Библиогр.: с.44. – № ГР 0112РК02597. – Инв. № 0213РК03165.
2. Тритий – это опасно / под. ред. В. А. Батурина // Челябинск – 2001. – 58 с. – URL: <https://explodder.info/book/chem/Тритий.pdf>. – Текст электронный.
3. Барчуков В.Г. Распространение трития и его соединений воздушным путем при нормальных условиях эксплуатации Балаковской АЭС / В.Г. Барчуков, О.А. Кочетков, Г.В. Фомин, Д.И. Кабанов, Е.А. Иванов // АНРИ. – 2016. – № 1. – С. 49–54. – Библиогр.: с. 54.
4. Ляхова О.Н. К вопросу о путях миграции трития за пределы бывшей испытательной площадки «Дегелен» / О.Н. Ляхова, Н.В. Ларионова, С.Н. Лукашенко, А.О. Айдарханов, Е.В. Спирин // Бюлл. Нац. радиационно-эпидемиологического регистра. Радиация и риск. – 2014. – Том 23. – № 1. – С. 97–105. – Библиогр.: с. 104.
5. Гигиенические нормативы [Санитарно-эпидемиологические требования к обеспечению радиационной безопасности]: [Утверждены приказом Министра национальной экономики Республики Казахстан от 27 февраля 2015 года № 155] / М-во юстиции РК.
6. МУ 2.6.1.15-02. Тритий и его соединения. Контроль величины индивидуальной эффективной дозы внутреннего облучения при поступлении в организм человека. – Введ. 2002-04-16. – М.: Минатом России, Минздрав России, 2004.

СЕМЕЙ СЫНАҚ ПОЛИГОНЫ АУМАҒЫНДА ^3H АУАМЕН ТҮСКЕН КЕЗДЕГІ ПЕРСОНАЛ МЕН ТҮРҒЫНДАРҒА ТҮСЕТІН ДОЗАЛЫҚ ЖҮКТЕМЕДЕГІ ҮЛЕСІН АНЫҚТАУ

О.О. Марченко, О.Н. Ляхова, Л.В. Тимонова

ҚР ҰАО РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Жұмыста Семей сынақ полигонының (ССП) «Дегелең» алаңындағы штольнялардың орналасқан жерлеріндегі атмосфералық ауадағы тритийдің (^3H) құрамы бойынша деректер берілген. Тритийленген су (НТО) мен газтәрізді қосылулардың (НТ) «Дегелең» алаңы аумағының ауа ортасында да және оның шегінен тыс жерлердегі ауа ортасында да бар екендігі белгіленді.

Алынған деректердің негізінде «Дегелең» алаңы үлгісінде ауамен түсу кезіндегі персонал мен тұрғындарға түсетін дозалық жүктемедегі ^3H үлесі анықталды. Ауадағы ^3H шоғырлануы максималды жерлерде жұмыстар жүргізген кезде персоналға түсетін (ингаляциялық түсу) дозалық жүктемедегі ^3H үлесі 1% аспайтынды құрайтыны анықталды. «Дегелең» алаңынан тыс суда және ауада ^3H жоғары шоғырлануы бар ағынсулар орналасқан жерлерде шаруашылық қызметін жүргізген жағдайда ^3H тұрғындарға түсетін дозалық жүктемедегі үлесі шамамен 10% құрайды.

**DETERMINING CONTRIBUTION OF ^3H TO RADIATION EXPOSURE OF POPULATION AND
PERSONNEL WHEN ENTERING WITH AIR AT THE TERRITORY OF SEMIPALATINSK TEST SITE**

O.O. Marchenko, O.N. Lyakhova, L.V. Timonova

Branch "Institute of Radiation Safety and Ecology" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The paper provides tritium (^3H) concentrations in atmospheric air in the venues of tunnels at the «Degelen» testing site of Semipalatinsk Test Site (the STS). Tritiated water (HTO) and gaseous tritium compounds (HT) in air environment were registered in air environment both at the «Degelen» testing site and beyond its boundaries.

Based on the data obtained, contribution of ^3H entering with air into radiation exposure of personnel and population was determined through the example of the «Degelen» testing site. It was found, that contribution of ^3H to radiation exposure of the personnel (inhalational intake), carrying out works in the venues with the maximum concentration of ^3H in the air does not exceed 1%. Contribution of ^3H to the radiation exposure of population, performing economic activities beyond the «Degelen» site, in the venues of streamflows with high concentration of ^3H in water and in air will be approximately 10%.

УДК: 29.19.21

**ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА, МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА И СТАБИЛЬНОСТЬ
СПЛАВОВ ГЕЙСЛЕРА $Mn_2Co_{1-x}V_xZ$ ($Z = Al, Ga$)**¹⁾ Абуова Ф.У., ¹⁾ Инербаев Т.М., ¹⁾ Абуова А.У., ²⁾ Каптагай Г.А., ¹⁾ Мерәлі Н.А., ¹⁾ Солтанбек Н.¹⁾ *Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан*²⁾ *Казахский национальный женский педагогический университет, Алматы, Казахстан**E-mail: fatika_82@mail.ru*

Методами компьютерного моделирования с использованием теории функционала плотности изучены два набора сплавов Гейслера вида $Mn_2Co_{1-x}V_xZ$ ($Z = Al, Ga$). Исследованы изменения абсолютной величины и направления магнитных моментов ионов решетки в зависимости от химического состава. Для объяснения полученных результатов проведен топологический анализ зарядового распределения на атомах кристаллической решетки. Показано, что изменения магнитных свойств определяются зарядовыми состояниями ионов системы. Фундаментальным отличием между Al- и Ga-содержащими сплавами является способность ионов Ga, в отличие от ионов Al, менять свое зарядовое состояние по мере увеличения концентрации ванадия, что дает дополнительную степень свободы для модификации электронной структуры изученных соединений.

Ключевые слова: теория функционала плотности, сплавы Гейслера, магнетизм, распределение зарядов.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы сплавы Гейслера на основе Mn привлекают большое внимание благодаря своим уникальным свойствам и возможным применениям во многих областях техники. Одним из важных применений сплавов Гейслера на основе Mn являются их использование в области спинтроники – области электроники, где перенос энергии и информации осуществляется не электрическим током, а током спинов. До сих пор сообщалось, что довольно много сплавов Гейслера на основе Mn являются полуметаллами или бесщелевыми спиновыми полупроводниками [1–10].

Полуметаллические материалы обладают 100%-ной спиновой поляризацией электронов проводимости на уровне Ферми (E_F) и имеют большое значение в спинтронике. Бесщелевые спиновые полупроводники представляет собой промежуточное состояние между хорошо известными полуметаллическими ферромагнетиками и бесщелевыми полупроводниками. В случае бесщелевых спиновых полупроводников один спиновой канал имеет открытую запрещенную зону при E_F , как полуметалл, а другой спиновой канал имеет нулевую ширину, как бесщелевой полупроводник. Таким образом, проводящие электроны или дырки не только на 100% поляризованы по спину, но и легко могут быть переведены в возбужденное состояние. Среди этих сплавов Гейслера на основе Mn особенно интересны Mn_2CoZ ($Z = Al, Ga$), поскольку они не только теоретически предсказаны как полуметаллы / бесщелевые спиновые полупроводники, но также могут быть реализованы экспериментально.[4, 5, 12] Было обнаружено, что уникальные свойства сплавов Mn_2CoZ в значительной степени связаны с преимущественным заполнением атомов Mn и Co в кубической решетке сплавов Гейслера.

В данной работе мы теоретически исследуем изменения величины и направления магнитного момен-

та на ионах, их зарядового состояния и влияния их изменения на постоянные решетки сплавов Гейслера состава $Mn_2Co_{1-x}V_xZ$ ($Z = Al, Ga$) в зависимости от степени замещения атомов Co на атомы V. Показано, что при изменении концентрации V в системе приводит к перераспределению заряда в системе, что влияет как на величину и направление магнитного момента на других ионах, так и, вследствие изменения ионного радиуса, связанного с изменением зарядового состояния, на величину постоянных решетки. Сплавы $Mn_2Co_{1-x}V_xGa$ имеют дополнительную степень свободы для изменения электронной структуры по сравнению с соединениями $Mn_2Co_{1-x}V_xAl$ ввиду того, что в Al-содержащих сплавах зарядовое состояние не изменяется по мере изменения концентрации V, в отличие от аналогичной величины для атомов Ga в сплавах $Mn_2Co_{1-x}V_xGa$.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчеты электронной структуры проводились в рамках DFT с использованием пакета VASP [15–17]. Обменно-корреляционное взаимодействие учитывалось в приближении обобщенного градиента (GGA) в виде функционала Пердью-Берка-Эрнцсхофа (PAW) [18]. Для всех случаев использовалась отсечка базисной плоской волны 500 эВ. Сетка из $10 \times 10 \times 10$ точек использовалась для интегрирования зоны Бриллюэна. Эти параметры обеспечивали хорошую сходимость по полной энергии. Допуск сходимости для расчетов был выбран как разница по полной энергии в пределах 10^{-6} эВ/атом. Распределение зарядов на ионах исследовалось при помощи топологического анализа Бадера [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сплавы Гейслера кристаллизуются в высокоупорядоченную кубическую структуру и имеют стехиометрический состав X_2YZ , где X и Y – элементы переходных металлов, а Z – элемент основной группы.

В сплавах Гейслера есть четыре позиции, а именно А (0, 0, 0), В (0,25, 0,25, 0,25), С (0,5, 0,5, 0,5) и D (0,75, 0,75, 0,75) соответственно. Элементы переходного металла X, Y входят в узлы А, В, С, а элемент Z основной группы всегда входит в узлы D в кубической решетке. [14]. Элементарная ячейка сплава Гейслера структуры $L2_1$ и локальное окружение каждого атома показаны на рисунке 1.

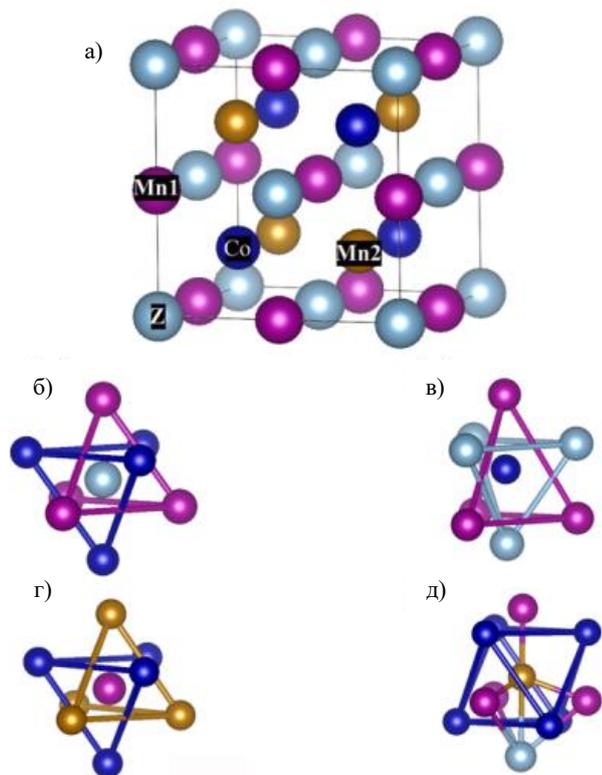


Рисунок 1. Модельная ячейка сплава Гейслера Mn_2CoZ (а) и локальное окружение атома Z (б), Co (в), Mn1 (г) и Mn2 (д)

Всего в элементарной ячейке содержится 8 атомов Mn, 4 атома Co и 4 атома элемента Z. Сплав Гейслера Mn_2CoZ содержит два симметрично-неэквивалентных атома Mn, которые далее будут обозначаться как Mn1 и Mn2. Атомы Co и Z занимают узлы решетки, симметрично-эквивалентные между собой.

Атом Z находится в центре двух вложенных тетраэдров, в вершинах которых находятся атомы Mn1 и Co (рисунок 1-б). Атомы Co и Mn1 находятся в таком же окружении, но в вершинах тетраэдров находятся атомы Z и Mn1 в случае атома Co (рисунок 1-в) и атомы Co и Mn2 в случае атома Mn1 (рисунок 1-г). Атом Mn2 находится в тетраэдрическом окружении атомов Mn1 и находится в центре треугольной антипризмы, образованной атомами Co. Также в ближайшем окружении находится один атом Z, как это показано на рисунке 1-д.

Рассчитанные значения магнитных моментов на атомах различных рассмотренных сплавов Гейслера представлены на рисунке 2. Для обоих сплавов Mn_2CoZ ($Z = Al, Ga$) направления магнитных моментов на ионах Mn1 и Mn2 направлены в противоположные стороны и значения величин магнитных моментов на них равны $-1,6$ и $2,6 \mu_B$, соответственно. В процессе расчетов мы протестировали возможность вырождения состояния магнитного упорядочения, т.е. когда примерно одной и той же энергии соответствует различный магнитный порядок. Оказалось, что в данном случае попытка рассмотрения ферромагнитного порядка на обоих типах атома Mn приводит к существенному росту энергии основного состояния, намного (примерно, 2 эВ) превышающему соответствующую величину для антиферромагнитного упорядочения. Такая же картина наблюдается и для сплава Mn_2CoGa , за исключением величины магнитного момента на ионах Mn, которые составляют $-1,8$ и $2,8 \mu_B$ на ионах Mn1 и Mn2, соответственно.

По мере замещения атомов Co на атомы V величины магнитных моментов на ионах Mn1 и Mn2 начинают меняться. Для сплава $Mn_2Co_{1-x}V_xAl$ при $x=0,5$ половина ионов Mn1 меняет направление магнитного момента на противоположное, при $x=0,75$ направление магнитного момента меняется у 3 из 4 ионов, а при полном замещении Co на V это происходит на всех ионах типа Mn1. Величина магнитного момента на ионах типа Mn2 практически линейно спадает с величины $2,6 \mu_B$ до значения $0,7 \mu_B$. На ионах V магнитный момент уменьшается по модулю по мере увеличения концентрации ванадия с $-1,6 \mu_B$ при $x=0,25$ до значения $-0,7 \mu_B$ при $x=0,75$. При полном замещении кобальта на ванадий направление магнитного момента на ионах V становится вверх и его значение сравнивается с аналогичной величиной для ионов Mn2. Намагниченность ионов Co от концентрации V не зависит.

Зависимость магнитного момента на атомах по мере замещения Co на V в сплаве $Mn_2Co_{1-x}V_xGa$ имеет как сходство, так и существенные отличия от рассмотренного выше случая $Mn_2Co_{1-x}V_xAl$. Так, магнитный момент на ионах Co практически не меняется с увеличением концентрации V. Поведение магнитного момента на V в обоих случаях близко качественно, но несколько отличается количественно. Именно, значения магнитного момента при $x=0,5$ и $x=0,75$ практически одинаковы, а при полном замещении Co на V величина магнитного момента на V несколько больше и равна $1,1 \mu_B$. Наиболее существенно отличие получено для магнитных моментов на ионах Mn. Так, на ионах типа Mn2 магнитный момент при $x=0$ и $x=1$ практически одинаков и равен $2,8$ и $2,6 \mu_B$, соответственно. При остальных значениях x магнитный момент на этих ионах равен $2 \mu_B$. Для ионов типа Mn1 также происходит их расщепление на два подти-

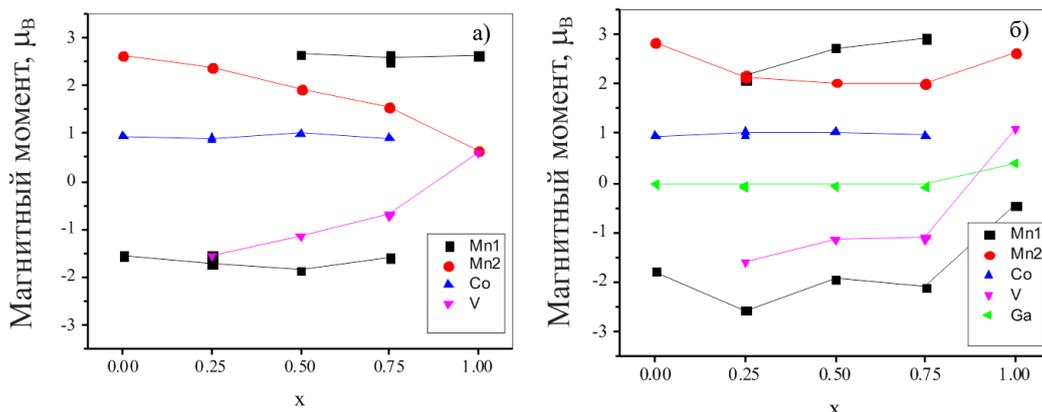


Рисунок 2. Значения магнитного момента на ионах в сплавах Гейслера $Mn_2Co_{1-x}V_xAl$ (а) и $Mn_2Co_{1-x}V_xGa$ (б)

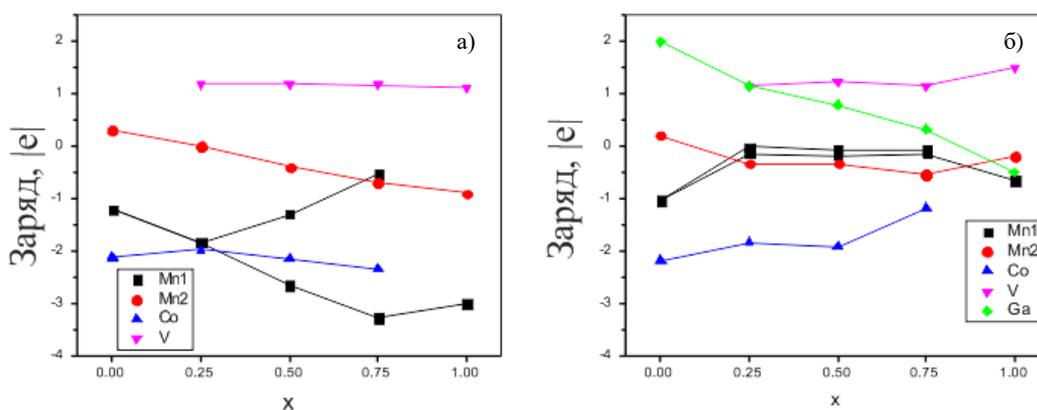


Рисунок 3. Значения эффективного заряда на ионах в сплавах Гейслера $Mn_2Co_{1-x}V_xAl$ (а) и $Mn_2Co_{1-x}V_xGa$ (б).
 Зарядовое состояние ионов алюминия +3 и здесь не показано

па как по направлению, так и по величине магнитного момента. Но в отличие от сплава $Mn_2Co_{1-x}V_xAl$ здесь этот эффект наблюдается в диапазоне $0,25 \leq x \leq 0,75$. Кроме того, при $x=1$ значение магнитного момента на этих ионах равно $-0,4 \mu_B$. Здесь же, в отличие от других случаев, расчеты показывают наличие магнитного момента $0,4 \mu_B$ на ионах Ga.

Очевидно, что такие изменения магнитных свойств ионов сопряжены с изменением их электронного состояния. Для анализа этих изменений мы воспользовались методом топологического зарядового анализа Бадера [19]. Результаты представлены на рисунке 3, откуда из сравнения с данными на рисунке 2, видно, что зарядовое состояние ионов хорошо коррелирует с их магнитным состоянием. Расщепление ионов типа Mn1 на два подтипа обусловлено двумя типами их зарядового состояния, что является одним из определяющих факторов магнитного момента на них. Вторым важным фактором является влияние кристаллического поля, обусловленное эффектом ближайшего окружения иона.

Для иллюстрации данного эффекта вспомним, что электронная оболочка атома Mn имеет вид $[Ar] 3d^5 4s^2$ и магнитные свойства ионов определяются конфигурацией d -уровней. Под влиянием кристаллического

поля 5-кратно (без учета спина) вырожденные d -уровни расщепляются на 2 набора подуровней e_g и t_{2g} , как это показано на рисунке 4.

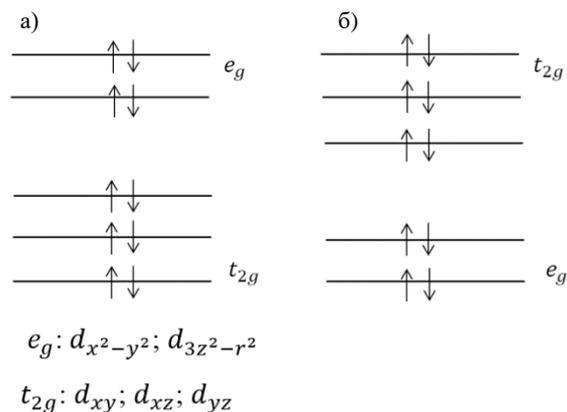


Рисунок 4. Расщепление атомных d -уровней под действием кристаллического поля

Под влиянием кристаллического поля либо подуровни t_{2g} имеют более низкую энергию по сравнению с подуровнями e_g (рисунок 4-а), либо наоборот (рисунок 4-б). В случае иона Mn с 5 d -электронами, маг-

нитный момент иона будет равен $1 \mu_B$ при обоих вариантах расположения подуровней e_g и t_{2g} относительно друг друга. В случае, показанном на рисунке 4-а, 5 электронов займут все 3 состояния энергии t_{2g} , кроме одного, будут двукратно заняты. Во втором случае, состояния e_g все будут двукратно заняты, а один электрон займет состояние в подуровне e_g . При изменении числа d -электронов на ионе в виду изменения его зарядового состояния, возможны различные варианты реализации магнитного момента на основе рассмотренных случаев.

Так, ионы Mn1 с низкоспиновым состоянием – ионы с малым по абсолютным по величине значением заряда, и значение магнитного момента ближе к $1 \mu_B$. Ионы со значением магнитного момента около $3 \mu_B$ являются ионами с зарядовым состоянием -2 , при этом подуровни e_g находятся ниже по энергии. В результате 4 электрона занимают подуровень e_g , а оставшиеся 3 d -электрона имеют, согласно правилу Хунда, однонаправленные спины, и дают результирующий момент $3 \mu_B$.

Плавное изменение зарядового состояния на ионах Mn2 ведет к такому же плавному изменению их магнитного состояния, связанному с изменением заполнения d -уровней. Изменение же направления магнитных моментов в рамках данного исследования мы объяснить не можем, поскольку это связано с изменениями обменного взаимодействия, которое надо изучать отдельно.

На рисунке 2, б видно резкое изменение магнитных свойств на ионах сплава Mn_2VGa по сравнению с другими сплавами в этом же ряду. Для сплавов $Mn_2Co_{1-x}V_xAl$ данный эффект вообще не наблюдается. Мы предполагаем, что это связано с различиями в зарядовом состоянии ионов Mn1 в обеих сериях соединений. Поскольку V в рассмотренных сплавах Гейслера является положительно заряженным ионом, а Co – отрицательно заряженным, то ввиду того, что для нейтральных атомов их радиусы практически совпадают и равны 125 пм, можно предположить, что в случае противоположно заряженных ионов их ионные радиусы будут отличаться. В результате, такая замена должна вести к уменьшению межатомного расстояния и, как следствие, к уменьшению постоянной решетки кристалла. Но в случае сплава $Mn_2Co_{1-x}V_xAl$ данный эффект компенсируется ростом ионного радиуса ионов Mn1, чего нет в случае сплава $Mn_2Co_{1-x}V_xGa$. Мы не можем привести количественный анализ данных рассуждений, поскольку в литературе нет данных для ионных радиусов Mn и Co в случае, когда они заряжены отрицательно. Но наши рассуждения подтверждаются расчетами постоянной решетки при нулевом внешнем давлении для рассмотренных соединений, результаты которых приведены на рисунке 5. В случае сплава $Mn_2Co_{1-x}V_xGa$ при $x=1$ происходит резкое уменьшение параметра решетки по сравнению с этой величиной для других соединений.

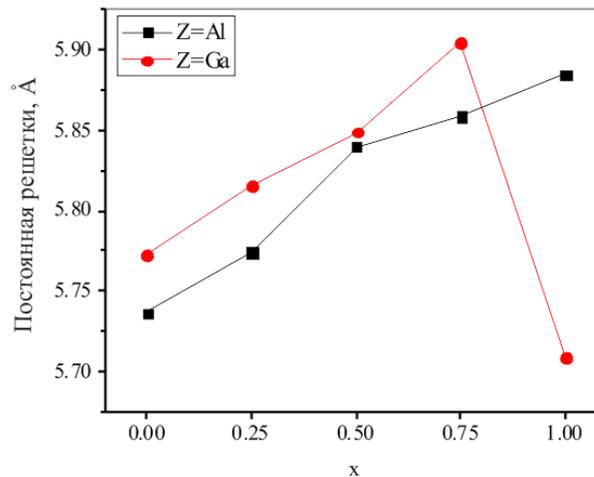


Рисунок 5. Постоянные решетки сплавов Гейслера $Mn_2Co_{1-x}V_xZ$ ($Z = Al, Ga$) в зависимости от содержания V

Обнаруженные отличия между двумя сериями сплавов обусловлены отличиями в электронных свойствах ионов Al и Ga. Зарядовое состояние алюминия во всех рассмотренных сплавах Гейслера $+3$, в отличие от той же величины ионов Ga, которая меняется, как это показано на рисунке 3, б. Ионы Ga, в отличие от Al, дают дополнительные степени свободы по перераспределению электронов, что и определяет различие в электронных свойствах рассмотренных сплавов $Mn_2Co_{1-x}V_xAl$ и $Mn_2Co_{1-x}V_xGa$. При дальнейшем изучении электронных свойств исследованных сплавов для их приложений в спинтронике необходимо рассматривать модельные ячейки большего размера, и приведенные результаты являются только первым шагом.

Выводы

Первопринципными методами изучен ряд соединений сплава Гейслера вида $Mn_2Co_{1-x}V_xZ$ ($Z = Al, Ga$). Исследованы изменения магнитного момента на атомах в зависимости от химического состава. Для объяснения полученных результатов проведен топологический анализ зарядового распределения на ионах. Показано, что изменения магнитных свойств определяются зарядовыми состояниями ионов системы. Выявлено свойство, определяющее отличие электронных свойств изученных Al- и Ga-содержащих сплавов Гейслера, заключающееся в том, что ионы Al, в отличие от ионов Ga, не меняют свое зарядовое состояние по мере изменения относительного содержания Co и V в соединениях.

Данная работа выполнена в рамках грантового проекта AP08957176 «Первопринципный дизайн полностью скомпенсированных ферромагнитных материалов для приложений в спинтронике» на 2020–2022 гг. МОН РК.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Weht, W.E. Pickett, Phys. Rev. B 60 (1999) 13006.
2. K. Ozdogan, I. Galanakis, E. Sasioglu, B. Aktas, J. Phys. Condens. Matter 18 (2006) 2905.
3. H.Z. Luo, H.W. Zhang, Z.Y. Zhu, L. Ma, S.F. Xu, G.H. Wu, X.X. Zhu, C.B. Jiang, H.B. Xu, J. Appl. Phys. 103 (2008) 083908.
4. G.D. Liu, X.F. Dai, H.Y. Liu, J.L. Chen, Y.X. Li, G. Xiao, G.H. Wu, Phys. Rev. B 77 (2008) 014424.
5. S. Ouardi, G.H. Fecher, C. Felser, Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 100401.
6. X.R. Chen, M.M. Zhong, Y. Feng, Y. Zhou, H.K. Yuan, H. Chen, Phys. Status Solidi B 252 (2015) 2830.
7. Y. Feng, T. Zhou, X.R. Chen, H.K. Yuan, H. Chen, J. Phys. D Appl. Phys. 48 (2015) 285302.
8. M. Meinert, J.M. Schmalhorst, G. Reiss, J. Phys. Condens. Matter 23 (2011) 036001.
9. H.Z. Luo, G.D. Liu, F.B. Meng, L.L. Wang, E.K. Liu, G.H. Wu, X.X. Zhu, C.B. Jiang, Comput. Mater. Sci. 50 (2011) 3119.
10. A. Abada, K. Amara, S. Hiadsi, B. Amrani, J. Magn. Magn. Mater 388 (2015) 59.
11. G.Z. Xu, E.K. Liu, Y. Du, G.J. Li, G.D. Liu, W.H. Wang, G.H. Wu, Europhysics Letters 102 (2013) 17007.
12. M.E. Jamer, B.A. Assaf, T. Devakul, D. Heiman, Appl. Phys. Lett. 103 (2013) 142403.
13. I. Galanakis, K. Özdoğan, E. Şaşıoğlu, S. Blügel, J. Appl. Phys. 115 (2014) 093908.
14. H.C. Kandpal, G.H. Fecher, C. Felser, J. Phys. D Appl. Phys. 40 (2007) 1507.
15. G. Kresse, Comput. Mater. Sci., 1996, 6, 15.
16. G. Kresse and J. Furthmüller, Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys., 1996, 54, 11169.
17. G. Kresse and D. Joubert, Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys., 1999, 59, 1758.
18. J. P. Perdew, K. Burke and M. Ernzerhof, Phys. Rev. Lett., 1996, 77, 3865.
19. Bader, R. F. W. Atoms in Molecules. A Quantum Theory; Clarendon Press: Oxford, UK, 1990.

$Mn_2Co_{1-x}V_xZ$ ($Z = Al, Ga$) ГЕЙСЛЕР ҚОРЫТПАЛАРЫНЫҢ ЭЛЕКТРОНДЫҚ ҚҰРЫЛЫМЫ, МАГНИТТІК ҚАСИЕТТЕРІ ЖӘНЕ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫ

¹⁾ Ф.У. Абуова, ¹⁾ Т.М. Инербаев, ¹⁾ А.У. Абуова, ²⁾ Г.А. Каптагай, ¹⁾ Н.А. Мерәлі, ¹⁾ Н.Солтанбек

¹⁾ Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

²⁾ Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан

$Mn_2Co_{1-x}V_xZ$ типіндегі Гейслер қорытпасының бірқатар қосылыстары ($Z = Al, Ga$) *ab initio* әдістерімен зерттелінді. Химиялық құрамына байланысты атомдардағы магниттік моменттің өзгеруі зерттелінді. Алынған нәтижелерді түсіндіру үшін иондарға зарядтың таралуына топологиялық талдау жасалынды. Магниттік қасиеттердің өзгеруі жүйеде иондардың заряд күйлерімен анықталатыны көрсетілген. Құрамындағы Al мен Ga қорытпаларының арасындағы айырмашылық – Ga иондарының ванадий концентрациясы жоғарылаған сайын олардың зарядын өзгерту мүмкіндігі.

Түйін сөздер: тығыздық функционалы теориясы, Гейслер қорытпалары, магнетизм, зарядтардың таралуы.

ELECTRONIC STRUCTURE, MAGNETIC PROPERTIES AND STABILITY OF HEUSLER ALLOYS $Mn_2Co_{1-x}V_xZ$ ($Z = Al, Ga$)

¹⁾ F.U. Abuova, ¹⁾ T.M. Inerbayev, ¹⁾ A.U. Abuova, ²⁾ G.A. Kaptagay, ¹⁾ N.A. Merali, ¹⁾ N. Soltanbek

¹⁾ Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan

²⁾ Kazakh national women's pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

Two sets of Heusler alloys of the type $Mn_2Co_{1-x}V_xZ$ ($Z = Al, Ga$) were studied by computer simulation methods using density functional theory. Changes in the absolute value and direction of the lattice ions' magnetic moments are investigated depending on the chemical composition. Topological analysis of the charge distribution on the crystal lattice atoms is carried out to explain the results obtained. It is shown that changes in the magnetic properties are determined by the system's charge ions' states. The fundamental difference between Al- and Ga-containing alloys is Ga ions' ability, in contrast to Al ions, to change their charge state as the vanadium concentration increases, which gives an additional degree of freedom for modifying the electronic structure of the studied compounds.

Keywords: density functional theory, Heusler alloys, magnetism, charge distribution.

УДК 57:539.12.08:575.17

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ДОЗИМЕТРИИ В КАЗАХСТАНЕ**¹⁾ Бияхметова Д.Б., ¹⁾ Кенжина Л.Б., ¹⁾ Мамырбаева А.Н., ²⁾ Скаков М.К., ¹⁾ Айдарханов А.О., ³⁾ Градобоев А.В.****¹⁾ Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан****²⁾ РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, Казахстан****³⁾ Томский политехнический университет, Томск, Россия**

В статье раскрывается понятие биологической дозиметрии, как ведущей области исследований в современном научном пространстве радиоэкологии, ее сущность и основные закономерности. Приводятся сведения о новейших исследованиях биодозиметрии, проводимых в ИРБЭ – апробация прототипа калибровочной кривой «доза-эффект», усовершенствование базовой методики (анализ хромосомных aberrаций в лимфоцитах периферической крови человека), накопление статистических данных по фоновой стандартной частоте хромосомных aberrаций в разных регионах Казахстана. Также обозначена актуальность и задачи исследования данной тематики. Проведен обзор опыта исследований в области биологической дозиметрии в Казахстане, обозначено ее значение для развития науки страны, а также раскрываются перспективы развития и исследования, ведущиеся в данном направлении.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, развитие атомной энергетики в стране определяет высокую актуальность исследований прикладного и фундаментального характера в таких направлениях, как обеспечение эффективной радиологической безопасности каждого человека, готовность к молниеносному реагированию в случае аварийной ситуации, включая высокий уровень развития методов оперативной и долгосрочной оценки последствий облучения. Все эти принципы объединяет такая область, как биологическая дозиметрия.

Вместе с тем, анализ показывает, что термин «биологическая дозиметрия» или «биодозиметрия» имеет разные формулировки в разных научных работах. В некоторых работах под выражением «биодозиметрия» подразумевают определение количества радионуклидов в организме, суммарную или удельную радиоактивности биологического материала с помощью технических средств (гамма-спектрометр) [1–3]. M.L. Mendelsohn [4] определяет биодозиметрию как оценку физически, химически или биологически значимой дозы предшествующего воздействия, используя наблюдение за биологическим субъектом или осуществляя физическими, химическими или биологическими способами измерение параметров материала, полученного из этого субъекта. Однако, на наш взгляд, более корректным является понимание сущности биодозиметрии, как биологической индикации дозы в той мере, в какой её величина отражается в соответствующих исследованиях.

Долгое время биологическая дозиметрия оставалась в тени физической дозиметрии, как способа, обладающего более высокой точностью и чувствительностью. Однако результаты с такими преимуществами достижимы при условии доступности самой физической дозиметрии. На практике же в различных аварийных ситуациях индивидуальные физические дозиметры не вполне адекватны или же отсутствуют. Это относится и к вовлечению в аварии как профес-

сиональных работников, подвергаемых различным видам радиационного воздействия, так и населения, по роду своей деятельности и образу жизни не подвергнутого сверхфоновому радиационному воздействию (исключая медицинские процедуры).

Помимо проблем методического и технического характера для качественной оценки дозы при использовании только физической дозиметрии, как правило, нет достоверной информации о длительности облучения, мощности дозы, измерений расстояния между облученным и источником излучения, положения тела в период воздействия и т.д. При подобных условиях единственными источниками необходимых данных становятся методы биологической дозиметрии. В пользу важности биологической дозиметрии, как одного из главных инструментов оперативной и достоверной оценки дозы облучения, следует учитывать то, что индивидуальные особенности функционального состояния или конституции конкретного организма, включая его радиочувствительность, могут существенно сказаться на степени тяжести и последствиях поражения [5, 6]. Биологические индикаторы, в отличие от физических показателей, позволяют в большей степени учесть эти обстоятельства, при этом отражая одновременно и величину поглощенной «физической» дозы.

Несмотря на небольшой период развития, биологическая дозиметрия на настоящий момент способна удивить многообразием методик и маркеров. Имеющими наиболее обширную опытную базу эффективного и успешного использования являются генетические методы – анализ хромосомных aberrаций, как нестабильных, так и стабильных (DCA, FISH, MN etc). Отдельным вниманием пользуются способы учета генных мутаций, использование экспрессии генов, анализа иммуногенетических, биохимических, физиологических маркеров, а также других биологических параметров [7].

Основным и зарекомендованным МАГАТЭ [7, 8] на мировом уровне способом биологической индикации дозы является цитогенетический анализ культур лимфоцитов периферической крови. Впервые данный метод был предложен как основополагающий в биологической дозиметрии М.А. Бэндером и П.К. Гучем в 1962 году [9]. Подсчет аберраций хромосом, индуцированных в лимфоцитах периферической крови после облучения людей позволял выстроить качественную дозовую оценку с помощью построенных на основании опытов *in vitro* кривых «доза–эффект» [10, 11].

Несмотря на определенные трудности, связанные с характером и режимом воздействия, а также трудоемкость и большую длительность обработки и интерпретации результатов, анализ аберраций хромосом достаточно хорошо зарекомендовал себя в случаях аварийного, относительно равномерного, облучения в дозах, вызывающих развитие острой лучевой болезни (ОЛБ) (1 Гр и более). Так как основным цитогенетическим индикатором радиационного воздействия считаются дицентрики, анализ этого вида аберраций хромосом даже называют «золотым стандартом» для биологической дозиметрии [12–14], что обусловлено их характерным внешним видом и низкой спонтанной частотой.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В Казахстане опыт использования биодозиметрических методов имеет сравнительно небольшую историю, несмотря на актуальность исследований в данном направлении. В начале XXI века исследования для оценки последствий облучения организма человека, стали особенно актуальны, ввиду прошлой деятельности Семипалатинского испытательного полигона (СИП). Как известно, Семипалатинская область подверглась обширному радиоактивному загрязнению в результате более 450 ядерных испытаний, из которых почти 100 были взорваны в атмосфере.

Первыми методиками биодозиметрии, получившими экспериментальный опыт в отечественных лабораториях был рутинный метод анализа культур лимфоцитов, а также микроядерный анализ [14]. Цитогенетический анализ культур лимфоцитов периферической крови стал основным методом Казахстанской биодозиметрии, ввиду своей доказанной результативности, надежности и точности. Наряду с этим, активно ведутся работы по внедрению других методик.

Первый цитогенетический скрининг хромосомных аберраций лимфоцитов периферической крови был произведен в 2001 году Институтом радиационной безопасности и экологии (ИРБЭ), совместно с Институтом физики и биофизики Зальцбургского университета и Национальным агентством новых технологий, энергии и окружающей среды (Италия) [15]. Начиная с 1996 года, значимые исследования в области биодозиметрии фокусировались на изучении цитогенетического статуса и параметров последствий облучения жителей населенных пунктов вблизи

СИП (населенные пункты – Семей, Долонь, Саржал, Кайнар и т.д.), являющихся наиболее пострадавшими от ядерных взрывов [16–21]. Данные исследования проводились преимущественно в рамках международных проектов сотрудничества с Японией. В этих исследованиях применялись такие методы, как анализ хромосомных аберраций в лимфоцитах периферической крови, микроядерный анализ.

Однако накопление отечественного биодозиметрического опыта не ограничивается целями оценки последствий аварийного облучения. Имеются данные по практическому использованию методики экспрессии мини-сателлитных мутаций, изучению генного полиморфизма на примере 3 поколений населения, проживавшего вблизи СИП в период проведения испытаний, а также применению метода ДНК-комет [22, 23].

Другой ведущий метод биологической дозиметрии, получивший признание во всем мире – метод флуоресцентной гибридизации *in situ* (FISH) для анализа транслокаций в хромосомах лимфоцитов, уже имеет практический опыт в Казахстане [24–26]. Также был освоен метод микроядерного теста с блокированием цитокинеза в лимфоцитах периферической крови человека на базе ИРБЭ НЯЦ РК [27]. Апробация метода была проведена успешно с использованием автоматизированной цитогенетической платформы на базе электронного флуоресцентного микроскопа фирмы Carl Zeiss AxioImager Z2, автоматической системы поиска и анализа метафаз Metafer 4/MSearch (MetaSystems, Германия). Данный аппарат является единственным в Казахстане и находится в ИРБЭ НЯЦ РК. Одна из апробаций метода FISH также была проведена на базе Института. Несмотря на высокую стоимость материалов и требуемого оборудования для использования перечисленных методов, имеющиеся исследования продемонстрировали свою компетентность и соответствие зарубежным аналогам.

К настоящему времени биодозиметрия в Казахстане находится в периоде усиленного развития. Однако уже можно сделать вывод о перспективности и значительном потенциале данного направления в отечественной науке. Проводятся исследования в целях определения цитогенетического статуса человека, не имевшего опыта острого случайного облучения, а также для комплексной оценки последствий рентгеновского облучения, либо получаемого при проведении различных медицинских процедур (ядерная медицина) [28, 29]. Наличие базы данных такого типа позволит более точно и адекватно разрабатывать меры для индивидуального дозиметрического контроля, а также повысят уровень радиационной культуры и грамотности медицинского персонала, что позволит добиться максимально эффективного обеспечения радиационной безопасности, снижения психоэмоционального напряжения и уровня стресса [29].

С 2018 года Казахстан входит в Азиатскую группу радиационной дозиметрии «ARADOS», являющуюся платформой для исследований радиационной дози-

метрии среди азиатских стран. Группа эпидемиологических и биодозиметрических исследований Института радиационной безопасности и экологии, представляющего Казахстан на данной платформе, регулярно участвует в межлабораторных сличениях и упражнениях совместно с другими странами [30]. Также наша страна является членом другой глобальной сети BIODOSE, занимающейся проблемами радиологической безопасности и защиты, а также исследованиями биологических эффектов радиации на организм человека. Сотрудничество с более развитыми странами позволяет повысить уровень выполнения различных биодозиметрических методик, оптимизировать и усовершенствовать процедуры их выполнения, вывести Казахстан на новую позицию в мировом научном пространстве в данном направлении.

Однако, отсутствие собственной калибровочной кривой [31] в стране на данный момент не позволяет проводить фундаментальные исследования в целях точной калькуляции дозы, либо ретроспективной оценки поглощенной дозы. Начиная с 2019 года на базе ИРБЭ НЯЦ РК активно ведутся работы по подготовке к построению линейной и линейно-квадратичной кривой «доза-эффект». Определена фоновая стандартная частота хромосомных aberrаций в четырех географических регионах Казахстана (Север, Юг, Запад, Восток), межрегиональная вариабельность в которых соответствует общепопуляционным значениям в мире [32, 33]. Расчет фоновой частоты для нестабильных хромосомных повреждений производился с использованием метода цитогенетического анализа дицентриков в лимфоцитах периферической крови с Гимза – окрашиванием, биологический материал был собран у группы коренных жителей городов областного значения каждого региона. Результаты демонстрируют межрегиональную вариабельность в пределах от $1,1 \pm 0,4$ до $3,09 \pm 0,6$ aberrантных клеток на 1000, что может быть обусловлено целым рядом субъективных и объективных факторов жизнедеятельности. Полученные данные необходимы при построении калибровочной кривой «доза-эффект» в качестве «нулевой» точки дозы, что снизит неопределенность при количественной оценке индивидуальной поглощенной дозы в чрезвычайных и аварийных радиологических ситуациях.

Также был эффективно апробирован простейший прототип калибровочной кривой «доза-эффект», с проведением пилотных экспериментов по облучению *in vitro*, в диапазоне доз 0,75 – 2,0 – 4 Гр для разных источников облучения и установлена дозовая зависимость частоты дицентриков, фрагментов и колец для данных дозовых точек. Был использован тот же метод дицентрического анализа. Полученная при помощи эксперимента *in vitro* классическая линейно-квадратичная зависимость демонстрирует сопоставимый результат индукции дицентриков в лимфоцитах с помощью γ -излучения (см. рисунок).

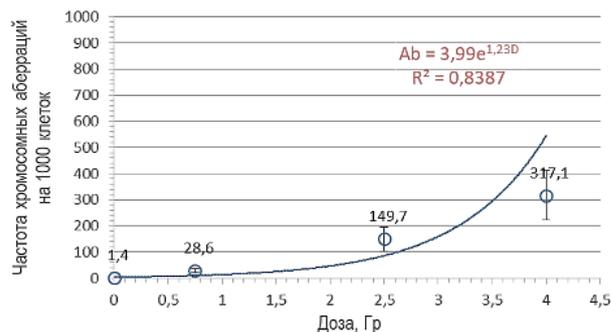


Рисунок. Аппроксимация дозовой зависимости хромосомных aberrаций у доноров

Апробированная методология, основанная на результатах данных экспериментов, уверенно приблизилась к построению собственной экспериментальной зависимости «доза – эффект», оптимизировала критерии и условия построения дозовой зависимости.

Данные работы были проведены лабораторией эпидемиологических и биодозиметрических исследований ИРБЭ в 2020 году, в рамках реализации научно-исследовательской работы подпрограммы «Прикладные научные исследования технологического характера в сфере атомной энергетики», мероприятия «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» на 2018–2020 гг. Кроме того, Казахстан, представляемый ИРБЭ, с 2020 года является страной – участником в проекте «Новые биологические и физические методы сортировки при чрезвычайных ситуациях радиационного характера» (BioPhyMeTRE), финансируемого программой НАТО «Наука ради мира и безопасности» (SPS). Данный проект направлен на совершенствование инновационных биологических и физических методов, позволяющих оперативно проводить скрининг, либо сортировку потенциально переоблученных лиц в случае радиологических аварийных ситуаций с использованием недорогих и удобных для каждой лаборатории в своей стране аналитических процедур и устройств. Проект координируется Итальянским национальным агентством новых технологий, энергетики и устойчивого экономического развития (ENEA) и помимо ИРБЭ включает Национальный институт здравоохранения (ISS) Италии и Институт Руджера Бошковича (RBI) в Хорватии. В настоящее время в рамках проекта НАТО «BioPhyMeTRE» ведется оптимизация и совершенствование стандартной методики анализа хромосомных aberrаций, используемой в группе биодозиметрических исследований ИРБЭ через апробацию модифицированного протокола методики совместно с биодозиметрической лабораторией ENEA (Италия) [34]. Также в 2018 и 2020 годах данная лаборатория участвовала в межлабораторных сличениях, в рамках сотрудничества стран Азии, входящих в сеть ARADOS.

К 2023 году в Казахстане планируется получение собственной калибровочной кривой «доза-эффект»,

что откроет лабораториям Казахстана новые перспективы в изучении глобальных проблем биологической дозиметрии, а также позволит повысить уровень обеспечения качественной оценкой влияния ионизирующего излучения разного характера на население Республики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в связи с повышенной вероятностью угрозы аварийных инцидентов радиационного характера в мире, рисками случайного облучения вследствие возможных аварийных ситуаций на предприятиях атомной промышленности и энергетики, незаконного сброса и захоронения ядерных отходов, необходимость фундаментальных и прикладных исследований в целях улучшения качества биологической дозиметрии именно в Казахстане достаточно очевидна. Радиационные аварийные ситуации могут затрагивать как персонал больниц и Центров ядерной медицины, аварийных работников из служб чрезвычайного реагирования, технический обслуживающий персонал медицинских учреждений, так и мирное население. Все перечисленные обстоятельства подтверждают высокую потребность в биологической дозиметрии для быстрой и эффективной первичной и вторичной сортировки, а также оценки последствий облучения на население.

Проведение практических исследований в целях усовершенствования применяемых методик биологической дозиметрии, повышение качества отдельных этапов их выполнения, а также интеграция с методами физической дозиметрии внесет вклад в создание комплексного подхода в дозиметрии, в целях получения высококвалифицированной оценки эффек-

тивности поглощенной дозы облучения населения при сценарии аварийного облучения, а также последствий медицинских процедур и профессионального облучения. Модификации стандартного протокола методик биодозиметрии, фракционирование анализируемого материала на первичной стадии, сравнительная оценка ведущей биодозиметрических методик с методами физической дозиметрии, использующими биологические объекты – данные задачи для исследования демонстрируют свою актуальность. Ввиду константной изменяемости биологических объектов, метод биологической дозиметрии, на наш взгляд, имеет очевидное преимущество перед физической, являясь более адекватным методом анализа пострадационных изменений.

Биологическая дозиметрия в Казахстане уже заявила о себе своим потенциалом развития на государственном уровне, однако все еще требует пристального внимания и поддержки. Высокий уровень качества биодозиметрии в стране внесет значительный вклад при переходе Казахстана к «зеленой экономике», согласно Концепции 2013 года. Высококвалифицированный индивидуальный дозиметрический контроль, являющийся одним из значимых результатов эффективной биодозиметрии, изменит мнение общественности от резкой «радиофобии» к доверию и комплексному пониманию Концепции развития атомной промышленности и энергетики. В свою очередь, развитие атомной энергетики в Казахстане будет способствовать обеспечению энергетической безопасности страны, а гарантированность энергетических ресурсов обеспечит устойчивое социально-экономическое развитие всего суверенного Казахстана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сотник Н.В., Рыбкина В.Л., Азизова Т.В. Новые подходы в биологической дозиметрии: создание комплексных биодозиметрических систем (обзор зарубежной литературы) // Мед.-биол. и соц.-психол. пробл. безопасности в чрезв. ситуациях. 2018. № 4. С. 90–96. DOI 10.25016/2541-7487-2018-0-4-90-96.
2. Владимиров В.Г., Смирнов А. Д. Биологическая дозиметрия при воздействии ионизирующей радиации // Военно-мед. журнал. 1978. – № 2. – С. 76–79.
3. Владимиров В.Г., Кириллов И.К. Роль дозиметрии и клиничко-лабораторных данных диагностики радиационных поражений и сортировки пострадавших на этапах медицинской эвакуации // Военно-мед. журнал. 1982. – № 1. – С. 30–33.
4. Mendelsohn M.L. Introduction to biological dosimetry // In: New Horizons in Biological Dosimetry. Proc. Internat. Symp. on Trends in Biological Dosimetry, held in Lerici, October 23–27, 1990. Eds. B.L. Gledhill, F. Mauro. – New York: Wiley Liss, Inc. 1991. P. 1–10.
5. Воробьев А.И., Бриллиант М.Д., Баранов А.Е и др. Принципы биологической дозиметрии при острой лучевой болезни // Клинич. медицина. – 1975. – Т. 53, № 5. – С. 69–74.
6. Владимиров В.Г. Предисловие // Радиобиологические подходы к диагностике лучевых поражений (Сборник научных трудов). – Л. 1987. С. 3–5.
7. IAEA (Int Atomic Energy Agency) 2011 (2011) Cytogenetic dosimetry: Applications in preparedness for and response to radiation emergencies. [Publication on September, 2011. Last access date (confirmation) 6 Sep 2017].
8. IAEA (Int Atomic Energy Agency) 2014 (2014) Using cytogenetic dosimetry for preparedness and response for radiological emergencies. [Publication on January, 2014. Last access date (confirmation) 6 Sept 2017] [in Russian].
9. Bender M.A., Gooch P.C. Persistent chromosome aberrations in irradiated human subjects // Radiat. Res. 1962. Vol. 16. № 1. P. 44–53.
10. Bender M.A., Gooch P.C. Types and rates of X ray induced chromosome aberration yields in human blood irradiated in vitro // Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A. 1962. Vol. 48. № 4. P. 522–532.
11. Abe Yu., Miura T., Yoshida M.A. et al. Increase in dicentric chromosome formation after a single CT scan in adults // Scientific Reports. 2015. № 5: 13882. 9 p. DOI: 10.1038/srep13882.

12. M'kacher R., Maalouf E.E.L., Ricoul M. et al. New tool for biological dosimetry: Reevaluation and automation of the gold standard method following telomere and centromere staining // *Mutat. Res.* 2014. Vol. 770. № 1. P. 45–53.
13. Sullivan J.M., Prasanna P.G.S., Grace M.B. et al. Assessment of biodosimetry methods for a mass casualty radiological incident: medical response and management considerations // *Health Phys.* 2013. Vol. 105. № 6. P. 540–554.
14. Abil'dinova GZh, Kuleshov NP, Sviatova GS (2003) Chromosomal instability parameters in the population affected by nuclear explosions at the Semipalatinsk nuclear test site. *Genetika* 39:1123–1127 [in Russian].
15. Testa A, Stronati L, Ranaldi R, Spanò M, Steinhäusler F, Gastberger M, Hubmer A, Pritskaya L, Akhmetov M (2001) Cytogenetic biomonitoring carried out in a village (Dolon) adjacent to the Semipalatinsk nuclear weapon test site. *Radiat Environ Biophys* 40:125–129.
16. Abil'dinova GZh, Kuleshov NP, Sviatova GS (2003) Chromosomal instability parameters in the population affected by nuclear explosions at the Semipalatinsk nuclear test site. *Genetika* 39:1123–1127 [in Russian].
17. Bersimbaev RI, Lindholm C, Tankimanova MK, Djansugurova LB (2002) Three-generation study of population living in the vicinity of the Semipalatinsk nuclear test-site—biosample database and population characteristics. *STUK (Helsinki, Finland) A* 191:32.
18. Bolegenova NK, Bekmanov BO, Djansugurova LB, Bersimbaev RI, Salama SA, Au WW (2009) Genetic polymorphisms and expression of minisatellite mutations in a 3-generation population around the Semipalatinsk nuclear explosion test-site, Kazakhstan. *Int J Hyg Environ Health* 212:654–660.
19. Chaizhunusova N, Yang TC, Land C, Luckyanov N, Wu H, Apsalikov K, Madiyeva M (2006) Biodosimetry study in Dolon and Chekoman villages in the vicinity of Semipalatinsk nuclear test site. *J Radiat Res* 47(Suppl A):A165–A169.
20. Takeichi N, Hoshi M, Iida S, Tanaka K, Harada Y, Zhumadilov Z, Chaizhunusova N, Apsalikov KN, Noso Y, Inaba T, Tanaka K, Endo S (2006) Nuclear abnormalities in aspirated thyroid cells and chromosome aberrations in lymphocytes of residents near the Semipalatinsk nuclear test site. *J Radiat Res* 47(Suppl A):A171–A177.
21. Tanaka K, Iida S, Takeichi N, Chaizhunusova NJ, Gusev BI, Apsalikov KN, Inaba T, Hoshi M (2006) Unstable-type chromosome aberrations in lymphocytes from individuals living near Semipalatinsk nuclear test site. *J Radiat Res* 47(Suppl A):A159–A164.
22. Bersimbaev RI, Lindholm C, Tankimanova MK, Djansugurova LB (2002) Three-generation study of population living in the vicinity of the Semipalatinsk nuclear test-site – biosample database and population characteristics. *STUK (Helsinki, Finland) A* 191:32.
23. Chenal, C., Legue, F., & Nourgalieva, K. (2006). Delayed effects of low level acute irradiation and chronic environmental radioactive contamination on DNA lymphocytes of people living in Dolon, a settlement located in the vicinity of the Semipalatinsk nuclear test site (Kazakhstan). *Science of The Total Environment*, 369(1-3), 91–98.
24. Цитогенетическая оценка хронического влияния рентгеновского излучения на человека. Тезисы докладов IV международной научно-практической конференции «Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и перспективы развития» 25–27 августа 2010 г. С. 123–124.
25. Кенесарина А.О., Мамырбаева А.Н., Кенжина Л.Б. Определение фоновой частоты стабильных транслокаций методом FISH у населения территорий, прилегающих к Семипалатинскому испытательному полигону // *Мат. XV Междунар. научн. конф. студ., маг., молод. уч. «Ломоносов-2019», посв. 25-летию историч. выступл. Президента РК Н. А. Назарбаева в Каз. Фил. МГУ имени М.В.Ломоносова, Казахстан, Нур-Султан – 2019. С. 217–218.*
26. Chaizhunusova, N., Madiyeva, M., Tanaka, K., Hoshi, M., Kawano, N., Noso, Y., ... Inoue, K. (2017). Cytogenetic abnormalities of the descendants of permanent residents of heavily contaminated East Kazakhstan. *Radiation and Environmental Biophysics*, 56(4), 337–343. doi:10.1007/s00411-017-0717-2.
27. Кенжина Л.Б., Кенесарина А.О., Мамырбаева А.Н. Освоение метода биологической дозиметрии микроядерный тест лимфоцитов с блокированием цитокинеза (СВМН) // *Вестник НЯЦ РК. – 2019. – № 3 (79). – С. 109–113.*
28. Губицкая Е.Г., Чердниченко О.Г., Байгушикова Г.М., Ахматуллина Н.Б. Цитогенетический статус жителей Алматинской области // *Вестник Каз. НУ им. аль-Фараби. Серия биологическая. – 2007. – № 2. – С. 86–90.*
29. М.Н. Бурханова, 2А.М. Раушанова. Организация индивидуального дозиметрического контроля в медицинских учреждениях. *Вестник КазНМУ. 2018. С. 54–55.*
30. Kurihara, O., Na, W.-H., Qinjian, C., & Jang, S. (2020). ARADOS: Asian network for radiation dosimetry. *Radiation Measurements*, 106336. doi:10.1016/j.radmeas.2020.106336.
31. Snigiryova G (2009) The consequences of ionizing radiation effects: cytogenetic changes in human lymphocytes. Accessed 22 Feb 2017 [in Russian].
32. Кенжина Л.Б., Кенесарина А.О., Мамырбаева А.Н. Определение региональной фоновой частоты стабильных транслокаций у населения, проживающего на территории, прилегающей к Семипалатинскому испытательному полигону // *Вестник НЯЦ РК. – 2018. – № 4 (76). – С. 26–31.*
33. Кенжина, Л. Б. Определение региональной фоновой частоты нестабильных aberrаций у населения, проживающего на территории, прилегающей к Семипалатинскому испытательному полигону // *Вестник НЯЦ РК. – Курчатов, 2020. – Вып. 2. – С. 119–127.*
34. Antonella Testa, Clarice Patrono, Valentina Palma, Laura Kenzhina, Mamyrbayeva Aygul, Dina Biyakhmetova, Fail Zhamaldinov, Emanuela Bortolin, Sara Della Monaca, Paola Fattibene, Maria Cristina Quattrini, Nadica Maltar Strmecki, Ina Erceg, Maja Vojnič-Kortmiš (2020). NATO science for peace and security (SPS) project “biophymetre” novel biological and physical methods for triage in radiological and nuclear (r/n) emergencies. XIX SIRR Congresso Nazionale (10–12 Novembre 2020) *Book of abstracts. P. 86.*

ҚАЗАҚСТАНДА БИОЛОГИЯЛЫҚ ДОЗИМЕТРИЯНЫҢ ДАМУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

¹⁾ Д.Б. Бияхметова, ¹⁾ Л.Б. Кенжина, ¹⁾ А.Н. Мамырбаева, ²⁾ М.К. Скаков, ¹⁾ А.О. Айдарханов, ³⁾ А.В. Градобоев

¹⁾ ҚР ҰЯО РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

²⁾ «Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы» РМК, Курчатов, Қазақстан

³⁾ Томск политехникалық университеті, Томск, Ресей

Мақалада биоэкологияның қазіргі ғылыми кеңістігіндегі жетекші зерттеу саласы ретінде биологиялық дозиметрия ұғымы, оның мәні мен негізгі заңдылықтары ашылады. РҚЭИ – де өткізілетін биодозиметрияның жаңа зерттеулері туралы мәліметтер-«доза-әсер» қисығының прототипін апробациялау, базалық әдістемені жетілдіру (адамның перифериялық қанының лимфоциттеріндегі хромосомалық аберрацияларды талдау), Қазақстанның түрлі өңірлерінде хромосомалық аберрациялардың аялық стандартты жиілігі бойынша статистикалық деректерді жинақтау. Сондай-ақ, осы тақырыпты зерттеудің өзектілігі мен міндеттері көрсетілген. Қазақстанда биологиялық дозиметрия саласындағы зерттеулер тәжірибесіне шолу жүргізілді, оның ел ғылымының дамуы үшін маңызы белгіленді, сондай-ақ осы бағытта жүргізіліп жатқан даму перспективалары мен зерттеулер ашылды.

PROSPECTS OF BIOLOGICAL DOSIMETRY DEVELOPMENT IN KAZAKHSTAN

¹⁾ D.B. Byakhmetova, ¹⁾ L.B. Kenzhina, ¹⁾ A.N. Mamyrbayeva, ²⁾ M.K. Skakov, ¹⁾ A.O. Aydarkhanov, ³⁾ A.V. Gradoboev

¹⁾ Branch “Institute of Radiation Safety and Ecology” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

²⁾ RSE “National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan”, Kurchatov, Kazakhstan

³⁾ Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

The article reveals the concept of biological dosimetry as a leading field of research in the modern scientific space of radioecology, its essence and basic laws. Information about the latest biodosimetry studies carried out at the IRSE - testing of the prototype of the “dose-effect” calibration curve, improvement of the basic technique (analysis of chromosomal aberrations in human peripheral blood lymphocytes), accumulation of statistical data on the background standard frequency of chromosomal aberrations in different regions of Kazakhstan. The relevance and research objectives of this topic are also indicated. A review of the experience of research in the field of biological dosimetry in Kazakhstan is carried out, its significance for the development of the country's science is indicated, and the prospects for development and research in this direction are revealed.

УДК 620.19: 621.31

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ Ni-Cr С КОМПОЗИЦИОННЫМ ПОКРЫТИЕМ¹⁾ Скаков М.К., ²⁾ Жилкашинова Ас.М., ³⁾ Градобоев А.В., ²⁾ Жилкашинова Ал.М., ²⁾ Абишев М.Б.¹⁾ *Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан*²⁾ *Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан*³⁾ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия*

E-mail: assel2462@mail.ru

В статье описан способ изготовления образцов жаропрочного сплава на никелевой основе с последующим нанесением композиционного покрытия на основе (Cr-Al-Co-редкоземельная группа), полученного плазменным методом. Получены модельные жаропрочные сплавы на основе Ni-Cr (20X23H18) с заданной структурой. Изготовление опытных отливок 20X23H18 включало следующие операции: нагрев мерной шихтовой заготовки готового сплава; нагрев до температуры 1600 °С и расплавление металла в вакууме 10^{-2} – 10^{-4} Па.; заливка образца в форму при температуре металла 1480–1530 °С, температура формы при этом составляла 950–1000 °С. Произведены расчеты и математическая модель процесса формирования слитка, отражающая последовательности кристаллизации и непрерывность питания объема по высоте, температурное поле составной оболочки. Разработанная математическая модель показала, что в процессе производства слитков заливка расплава должна производиться при постоянном его уровне в воронке. Поэтому заполнение металлом изложницы рассматривалось как истечение жидкости из одного сосуда в другой с постоянным и переменным уровнем. Время заполнения изложницы определено как величина расхода при течении расплава через керамику литейного припаса. Предложена ионно-плазменная технология двухслойного покрытия с внутренним металлическим и внешним керамическим слоями на подготовленной поверхности матрицы жаропрочного сплава 20X23H18: Cr/Al/Co (поочередное нанесение слоев) + ZrO₂-Y₂O₃. Общая толщина двухслойного теплозащитного покрытия составила 180–190 мкм. Общая толщина внутреннего слоя (Cr/Al/Co) – 60–65 мкм с содержанием Al – 30–35% масс., Cr – 40–44% масс., Co – 30–34% масс. Толщина внешнего керамического покрытия составила (ZrO₂-Y₂O₃) 120–130 мкм, концентрация оксида иттрия и оксида циркония в жаростойком слое составила соответственно 40–43% масс., 60–63% масс. Нанесение покрытий осуществляли на ионно-плазменной установке, представляющей собой вакуумную камеру с двумя магнетронными распылительными системами несбалансированного типа и ионный источник с замкнутым дрейфом электронов.

ВВЕДЕНИЕ

Имеется ряд работ, посвященных изучению лопаток турбин, выработавших свой срок службы, который может составлять от 150 до 350 тысяч часов работы [1–3]. В авиадвигателестроении наиболее широко применяются сплавы Ni-Cr-Al, несмотря на то, что сплавы системы Ni-Cr-Al обладают высокой жаростойкостью, этого, однако, недостаточно [4]. Для турбинных лопаток требуются покрытия, которые способны длительно работать под нагрузкой при температуре металла вплоть до 1150–1200 °С. Один из способов решения данной проблемы – создание комбинированных металлических и металлокерамических высокотемпературных покрытий.

В настоящее время поиски новых высокотемпературных покрытий связаны прежде всего с оптимизацией химического состава новых композиций, с разработкой и освоением новых технологических процессов, основанных на использовании новых физических эффектов, а также с применением вновь создаваемых покрытий [5–7]. Часто базовой системой жаростойких покрытий является Me-Cr-Al, где в качестве Me выступают Fe, Co, Ni.

При длительном воздействии высоких температур (≥ 100 ч) под покрытием на глубину до нескольких сотен микрометров формируется ярко выражен-

ная зона диффузионного взаимодействия (вторичная реакционная зона на основе направленных поперек границы сплав/покрытие крайне нежелательных топологически плотноупакованных фаз пластинчатой формы, разупрочняющих материал лопаток [8–10].

Известен способ получения износостойкого покрытия, включающий вакуумное ионно-плазменное нанесение покрытия на основе сложного нитрида титана-хрома-циркония. В качестве дополнительных компонентов используют алюминий и ниобий в количестве 1–5 ат.% и содержание циркония более 5 ат.%, нанесение покрытия осуществляют с помощью расположенных горизонтально в одной плоскости трех дуговых испарителей, подключенных к сепаратору капельной фазы, следующих составов: титан-алюминиевый катод из сплава ВТ-5, комбинированный цирконий-ниобиевый катод и хромовый катод [11].

Поскольку важным требованием, предъявляемым к жаропрочности является термостабильность сплава-подложки, обеспечивающая ресурс и надежность готовых изделий, то технология выплавки жаропрочных сплавов на никелевой основе с заданной структурой позволяет достичь большего упрочняющего эффекта за счет γ' -фаз и карбидов, более высокой структурной стабильности. Однако, до сих пор при-

менение теплозащитных многослойных покрытий не позволяют в полной мере решить проблему снижения температуры деталей турбин в условиях высоких температур. Это связано с недостаточной теплопроводностью керамики, что не позволяет эффективно изолировать компоненты турбины двигателя от температур, превышающих критические для конкретного сплава. При нанесении таких покрытий необходимо обеспечить высокую адгезию покрытия и материала лопатки, поэтому при их конструировании необходимо применять нанесение нескольких слоев (керамического и металлического). Кроме того, использование ионно-плазменных технологий формирования структуры керамического слоя позволяет обеспечить необходимый уровень термической стойкости внешнего слоя в зависимости от условий работы в процессе быстрого изменения температур на поверхности деталей турбины в совокупности с жаростойким подслоем.

Целью настоящей работы является разработка и исследование способа изготовления образцов жаропрочного сплава на никель-хромовой основе с последующим нанесением плазменным методом композиционного покрытия на основе (Cr-Al-Co-редкоземельная группа).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для отработки комплексной технологии повышения ресурса работы лопаток турбин необходимо изготовить ряд модельных образцов жаропрочного сплава на основе Ni-Cr (20X23H18). Данный сплав получали методом вакуумной индукционной плавки слитка в цилиндрическую изложницу. Образцы сплавов получали на базе Национальной научной лаборатории коллективного пользования ВКУ им. С. Аманжолова. Нагрев мерной шихтовой заготовки готового сплава производили в установке типа УППФ-4. Замер температуры жидкого металла в ходе плавки осуществляли оптическим пирометром и погружной термопарой ВР5/20. Электропитание индукторов установки производили от тиристорных преобразователей ТПЧ-120, мощностью соответственно 120 кВт. Необходимо отметить, что конструкция УППФ-4 выполнена с системой автоматизированного управления процессом плавки, заливки и работы установки в соответствии с циклограммой, учитывающей запрограммированную технологию плавки и заливки расплава в изложницу. Операцию отрезания избыточной и донной части слитка производили на абразивно-отрезном станке, модернизированной модели универсального фрезерного станка марки ZAYER 1000 AM. При резке слитка во избежание загрязнений жидким стеклом, применяли водосмешиваемую смазочно-охлаждающую жидкость, представляющую собой смесь минерального масла, эмульгаторов, высокоэффективных пеногасителей, биостатических присадок и пр., марки «Вольгол-304».

Химический состав полученного сплава был определен на оптико-эмиссионном спектрометре

SPECTROMAXx (*SPECTRO Analytical Instruments GmbH, Германия*). Цифровой искровой генератор позволяет создавать искру повышенной энергии (метод HEPS) при подготовке образца к анализу для устранения влияния структуры. Частота тока в искре составляет от 50 до 1000 Гц. Анализируемые образцы устанавливаются на массивный стол. Благодаря большой массе стола, измерения проводятся без дополнительного охлаждения. Штыревой электрод имеет специальную конструкцию, что позволяет резко снизить эффект загрязнения образца материалом предыдущей пробы. В спектрометре SPECTROLAB (спектральный диапазон от 120 до 780 нм) может быть установлено до 108 спектральных каналов с фотомножителями на один спектрометр и до 128 спектральных каналов на CCD-детекторах на каждую из программ спектрометра в варианте с гибридной оптической системой.

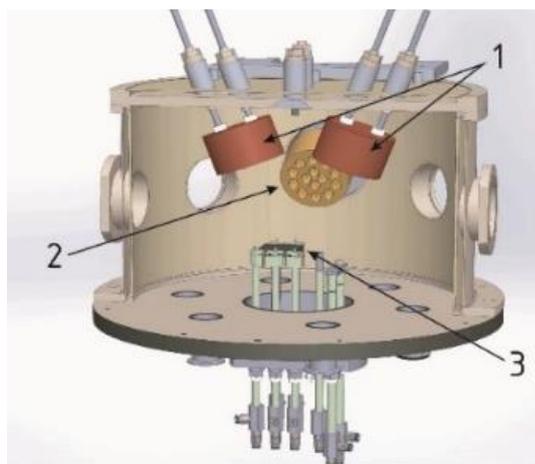
Для подтверждения соответствия полученного жаропрочного сплава требованиям ГОСТ 5632-72 «Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки», предъявляемым к стали 20X23H18, заготовки подвергали деформации методом прокатки на прокатном стане лаборатории. Испытания проводили на экспериментальной базе Национальной научной лаборатории ВКУ им. С. Аманжолова.

Были приготовлены образцы из полученного жаропрочного сплава в состоянии отливки. Образцы нарезались размерами 50×50×3 мм, а их поверхность обрабатывали по струйно-абразивной методике.

В качестве исходного сырья для приготовления мишени плазменного напыления использовали коммерческие порошковые материалы фракцией 15–60 мкм: Co ПК-1, Al АПЖ, Cr ЭРХ-0, Y₂O₃, ZrO₂. При изготовлении мишеней в качестве связующей жидкости использовали 1%-й поливиниловый спирт. Далее порошок перетирала в шаровой мельнице *PULVERISETTE 6* в течение 2,5 часа при 420–520 об/мин и перемешивали механической мешалкой в течение 1,5 часа. Порошки Cr/Al/Co перетирала каждый по отдельности для усредненной однородной гомогенизации и дисперсности с возможностью последующего поочередного нанесения каждого из порошков. Порошковые материалы ZrO₂-Y₂O₃ измельчали в мельнице одним составом. Формовка мишеней производилась в виде дисков диаметром 240 мм и толщиной 7,5–8 мм. Формование проводили в лабораторной пресс-форме путем одноосного прессования при давлении 60 МПа. Через сутки мишень отжигалась на воздухе при температуре 1050 °С в течение 1,2 часа. В качестве подложки для нанесения покрытий использовались пластины размером 50×50×3 мм из полученных нами модельных образцов сплава 20X23H18.

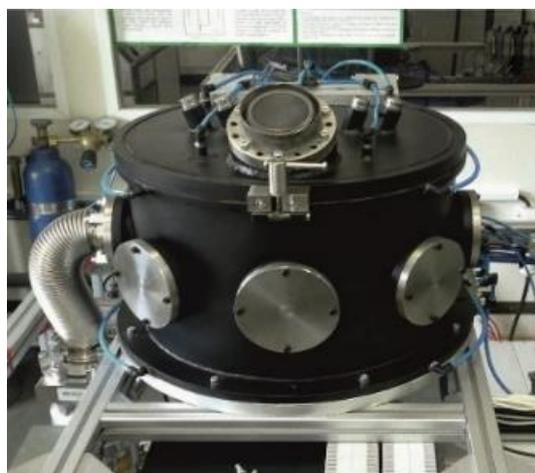
Ионно-плазменная установка для нанесения покрытий представляет собой вакуумную камеру с двумя магнетронными распылительными системами не-

сбалансированного типа и ионный источник с замкнутым дрейфом электронов. Экспериментальные исследования по нанесению покрытий проводили на базе лаборатории Национального исследовательского Томского политехнического университета (Россия) на основании договора о научно-техническом сотрудничестве. Вакуумная камера установки представляет собой герметичный объем диаметром 500 мм и высотой 300 мм, оснащенный фланцами различных диаметров для подключения вакуумной арматуры, датчиков вакуума и иных необходимых устройств (рисунок 1) [12].



1 – магнетронные распылительные системы;
2 – ионный источник с замкнутым дрейфом электронов;
3 – подложкодержатель с функцией нагрева

а)



б)

Рисунок 1. Схема (а) и внешний вид (б) ионно-плазменной установки.

Система подачи и регулировки газа представлена прецизионными регуляторами массового расхода *Bronkhorst ELFLOW* с точностью регулировки 0,01 мл/мин. Контроль температуры образцов осуществляется за счет хромель-алюмелевой термопары (диапазон измеряемых температур 200–1100 °С). Метод получения покрытий основан на вакуумном оса-

ждении из плазмы магнетронного разряда. Создавались у поверхности мишени магнетрона ловушки для электронов за счёт наличия скрещенных электрических и магнитных полей. Электроны имеют сложную и длинную траекторию движения и, таким образом, достигается высокая вероятность ионизации атомов рабочего газа. Ионы, ускоренные в электрическом поле, распыляют мишень, а наличие магнитного поля позволяет удерживать плазму вблизи неё.

Перед напылением покрытий рабочий объем вакуумной камеры откачивался до давления 10^{-4} Па, затем осуществлялась подача рабочего газа, после достижения рабочего давления зажигался разряд. Для экспериментов, независимо от состава плазмообразующего газа, установлен следующий температурный режим напыления: темп роста температуры на начальном этапе напыления 3,0 °С/мин, температура подложки через 1,7 часа составила 240–260 °С. Давление рабочего газа (аргона) составила (0,4 Па), и расстояние мишень-подложка 37–40 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Как известно, стабильные антикоррозионные свойства при повышенных температурах (даже для смесей кислот HCl; H₂SO₄; HNO₃; HF и др.) имеют сплавы на основе Ni-Cr (Mo; Fe; Cu и др.) [2–4]. Это частично обусловлено способностью никеля растворять в большом количестве легирующие элементы, такие как Cr, Mo, а также Fe, Cu. Хром в никелевых сплавах, а молибден в никелево-молибденовых сплавах тормозят активное растворение никелевой основы, хотя Cr обеспечивает ее пассивность, а Mo затрудняет. Благодаря этим свойствам Ni-Cr сплавы устойчивы в окислительных средах. Жаропрочный сплав 20X23H18 применяется в качестве работающих и направляющих лопаток турбин, поковок и бандажей, работающих при температуре 650-700 °С, детали камер сгорания, работающие при 1020–1100 °С.

При разработке способа получения модельных образцов сплава на основе Ni-Cr (20X23H18) было уделено пристальное внимание, поскольку получение стабильной жаропрочной матрицы для нанесения покрытий является важной частью общего технологического процесса. Естественно ожидать, что на структуре покрытия отражается и специфика подложки, прежде всего ее кристаллическая структура. Так, например, рост алюмохромного слоя может быть в той или иной мере связан с ориентацией подложки.

Изготовление опытных отливок из сплава 20X23H18 включала следующие операции:

- нагрев мерной шихтовой заготовки готового сплава. Металл помещали в плавильный быстротемпленный набивной тигель из оксида алюминия Al₂O₃, прошедший предварительное спекание с помощью графитового шаблона;
- расплавление металла и его нагрев до температуры 1600 °С производили в вакууме 10^{-2} – 10^{-4} Па.

Выдержка при температуре максимального нагрева составила не более 5 минут;

– заливка образца в форму производилась при температуре металла 1480–1530 °С, температура формы при этом составляла 950–1000 °С.

В схеме процесса формирования слитка мы использовали принцип суперпозиции: 1) выливание расплава из тигля; 2) как следствие, падение температуры расплава в разливочной воронке, так как часть тепла расходуется на прогрев керамики; 3) уменьшается температура в струе расплава пропорционально высоте падения; 4) уменьшение температуры, связанное с прогревом изложницы; 5) кристаллизация расплава, в отдельно взятых малых объемах, обусловленная разностью температур.

В таком случае, математическая модель этапов заполнения и кристаллизации слитка может быть представлена следующей системой уравнений тепловых балансов, которые учитывают данные процессы [13]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{k=1}^5 Q' = \sum_{k=1}^5 \sum_{j=1}^p Q_{k,j} \\ \sum_{i=1}^{n+1} (Q'' + Q_3) = \sum_{i=1}^{n+1} Q \sum_{r=1}^m Q_{i,r} \end{array} \right. , \quad (1)$$

где $\sum Q'$, $\sum (Q'' + Q_3)$ – это изменение теплосодержания движущегося металла, заполнившего фиксированный объем в изложнице и прибыли, Дж; k – участки движения расплава; p – схема теплообмена потока сплава с контактирующей средой; r – схема теплообмена расплава с контактирующей средой при его кристаллизации; $(n+1)(n+1)$ – количество фиксированных объемов по высоте изложницы с прибыльной надставкой; m – схема теплообмена малых объемов расплава с контактирующей средой при их кристаллизации.

В процессе заполнения расплавом изложницы происходит постепенное его охлаждение относительно исходной температуры начала заливки. Снижение температуры расплава происходит по следующим причинам: тепловые потери в струе металла вследствие теплового излучения при заливке из тигля; при достижении расплава керамической воронки происходит дальнейшее его охлаждение за счет теплообмена с воронкой; с открытой поверхности расплава в воронке, в течение всего периода заливки происходит понижение температуры за счет теплового излучения; под действием гравитационных сил, при достижении расплава дна керамического стакана, формируется струя металла, обеспечивающая заполнение полости изложницы.

Уравнение теплового баланса расплава при заполнении им изложницы в соответствии с рассмотренными выше этапами можно записать в следующем виде:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (2)$$

где Q – суммарное изменение теплового содержания расплава, Дж; Q_1 – количество теплоты, передаваемое от поверхности струи в окружающее пространство при течении расплава из тигля, Дж; Q_2 – количество теплоты, отведенное с поверхности металла в воронке окружающему пространству индукционной печи, Дж; Q_3 – количество теплоты, поглощаемое керамикой литейного припаса, Дж; Q_4 – количество теплоты, передаваемое с поверхности струи расплава в окружающее пространство при заполнении изложницы, Дж; Q_5 – количество теплоты, переданное в стенки изложницы, Дж.

Для решения этой задачи предварительно производим декомпозицию слитка на фиксированные объемы по высоте (рисунок 2).

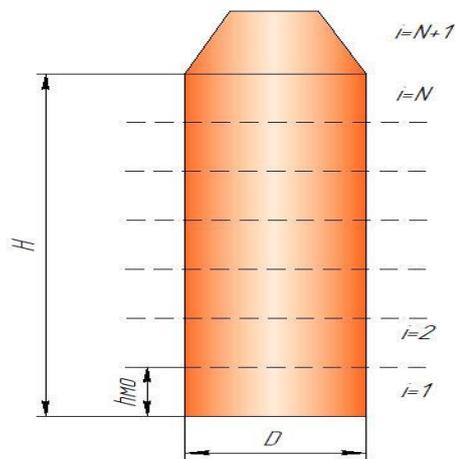


Рисунок 2. Декомпозиция слитка на фиксированные объемы

Таким образом, необходима математическая модель последовательности кристаллизации и непрерывности питания объемов по высоте. Вышележащий слой, по отношению к нижележащему фактически является прибылью. Тогда высота каждого слоя должна быть выбрана из условия зоны действия прибыльной части.

В процессе производства слитков заливка расплава производится при постоянном его уровне в воронке, поэтому заполнение металлом изложницы можно рассмотреть как истечение жидкости из одного сосуда в другой с постоянным и переменным уровнем. В свою очередь, время заполнения изложницы может быть определено как величина расхода при течении расплава через керамику литейного припаса.

Для расчетов заполнения формы в литейной гидравлике величина расхода при верхней заливке может быть определена как [13]:

$$Q = \mu S \sqrt{2gH}, \quad (3)$$

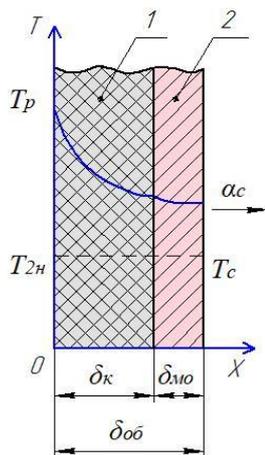
где Q – расход расплава при истечении, м³/с; μ – коэффициент расхода; S – площадь поперечного сечения канала, м²; H – гидростатический напор, м; g – ускорение силы тяжести, м²/с. Коэффициент рас-

хода литниковой системы (μ) определяется потерями напора и описывается соотношением [13]:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \varepsilon_i}}, \quad (4)$$

где $\sum \varepsilon_i$ – сумма потерь напора расплава в литниковой системе.

Математическая модель температурного поля составной оболочки из литейного припаса и металлической обечайки представлена на рисунке 3.



1 – керамическая оболочка; 2 – стальная обечайка

Рисунок 3. Схема распределения температуры в составной оболочке литейного припаса

Химический состав полученного сплава приведен в таблице 1. Получение заданного химического состава сплава обеспечивается благодаря конструкции вакуумной системы, исключающей попадание загрязнений при откачке аргона, подаваемого в плавильную камеру. Узел поворота тигля оснащен механизмом регулирования скорости слива расплава и последующего возврата печи подогрева формы из плавильной камеры в шлюзовую, т.е. сразу после полного слива металла и возврата тигля в исходное положение. Конструкция индуктора и нагревателей в печи подогрева формы позволяет регулировать перепад температуры по высоте печи, обеспечивая возможность направленного затвердевания отливки в литейном блоке (изложнице). Камера загрузки тигля шихтой отделена от плавильной камеры шлюзовым затвором, такая конструкция позволяет совместить во времени операции загрузки шихты, взятие пробы на химический анализ в процессе плавки, подшихтовка плавки модификаторами.

Таким образом, методом вакуумной индукционной плавки слитка в цилиндрическую изложницу, нами был получен цилиндрический слиток диаметром – 120 мм, длиной – 400 мм. Далее, слиток подвергали механической обработке.

Согласно технологической цепочке, после анализа химического состава сплава, слиток подвергли удалению прибыльной и донной частей и провели

механическую обработку припуска по диаметру. Согласно расчетной норме на припуск, токарная обработка по диаметру слитка, до момента фактического удаления поверхностных дефектов составила 4% или 3 мм на диаметр. После механической обработки по диаметру, для дальнейших исследований литую заготовку подвергали резке по плоскости на прямоугольные пластины размером 50×50×3 мм.

Таблица 1. Химический состав серийного жаропрочного сплава и полученного экспериментального образца 20X23H18

	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr
Требования ГОСТ 5632-72	до 0,2	до 1,0	до 2,0	17–20	до 0,02	до 0,0035	22–25
Полученный образец	0,15	0,91	1,95	18,65	0,015	0,0019	23,55

Для подтверждения соответствия полученного нами жаропрочного сплава требованиям ГОСТ 5632-72 «Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки», предъявляемым к стали 20X23H18, заготовки подвергали деформации на лабораторном прокатном стане. Начальная толщина заготовки деформации методом прокатки составляла 10,0 мм, толщина после прокатки – по 1,0 мм за проход, достигла 6,0 мм, степень обжатия – 40%. Прокатанную заготовку подвергали термической обработке в муфельной печи, согласно режиму – закалка 1050 °С, охлаждение – вода. Сравнительный анализ механических свойств полученных образцов, в сравнение с требованиями ГОСТ 5632-72 приведен в таблице 2. Вырезка образцов для исследования механических свойств производилась в продольном сечении заготовки, относительно прокатки.

Таблица 2. Механические свойства стали 20X23H18 при T=20 °С (требования ГОСТ 5632-72) в сравнении с экспериментальным образцом

Сортамент	σ_b , МПа	σ_t , МПа	δ_5 , %	Термообработка
Лист тонкий ГОСТ 5582-75	510	245	35	закалка 1080–1150 °С, охлаждение – вода
Экспериментальный образец	512	245	37	закалка 1050 °С, охлаждение – вода

Как известно, технология производства турбинных лопаток газотурбинного двигателя включает в себя не только производство жаропрочного сплава, но и нанесение на поверхность жаростойких покрытий. Как правило, это покрытия на основе Al-Cr. Различные комбинации третьих элементов – кремния, кобальта, редкоземельные и т.п. приводят к улучшению характеристик покрытия [8–10]. Кроме того, Al-Cr покрытия на жаропрочных никелевых сплавах широко применяют для защиты от газовой коррозии ответственных деталей газотурбинных двигателей. В состав покрытий, наряду с алюминием, могут входить и другие легирующие добавки, снижающие ско-

рость окисления и влияющие на процессы диффузионного взаимодействия покрытия с основой жаропрочных сплавов. Однако, в процессе эксплуатации в результате окисления и диффузионного перераспределения алюминия в матрицу, его содержание в покрытии постепенно уменьшается, изменяется фазовый состав покрытия и состав защитных оксидов.

Для предотвращения или снижения интенсивности процесса формирования вторичной реакционной зоны нами предложен ряд технических решений, которые могут способствовать выравниванию элементного состава поверхностного слоя жаропрочного сплава: нанесение поочередно на поверхность сплава перед формированием жаростойкого покрытия слоев чистых металлов – Cr и Al и Co, проведение вакуумной термической обработки, формирование на границе сплава с покрытием барьерного слоя, препятствующего развитию процессов диффузионного обмена легирующими элементами покрытия с основой. Для изолирования металлической матрицы от потока горячего газа, на ее поверхность наносили создающие термический барьер покрытия на основе $ZrO_2-Y_2O_3$, имеющие низкую теплопроводность.

Разработанные нами покрытия комбинированной системы состоят из компонентов Cr-Al-Co-редкоземельная группа для работы жаропрочных сплавов на никель-хромовой основе при высоких температурах. Формирование покрытий проводилось с использованием технологии ионно-плазменного напыления. Выбор ионно-плазменной технологии для создания покрытий обусловлен тем, что эта технология достаточно широко используется предприятиями при изготовлении и ремонте газотурбинных двигателей различного назначения. В качестве основного направления разработки и исследований были выбраны многослойные ионно-плазменные покрытия, обладающие наиболее высокими защитными свойствами, на рабочих лопатках турбин с равноосной и регламентированной структурой из жаропрочного сплава.

На основе анализа известных способов нами предложена технология двухслойного покрытия с внутренним металлическим и внешним керамическим слоями на подготовленной поверхности матрицы жаропрочного сплава: Cr/Al/Co (поочередное нанесение слоев) + $ZrO_2-Y_2O_3$. Общая толщина двухслойного теплозащитного покрытия составила 180–190 мкм. Общая толщина внутреннего слоя (Cr/Al/Co) – 60–65 мкм с содержанием Al – 30–35% масс., Cr – 40–44% масс., Co – 30–34% масс. Толщи-

на внешнего керамического покрытия ($ZrO_2-Y_2O_3$) составила 120–130 мкм, концентрация оксида иттрия и оксида циркония в жаростойком слое составила соответственно 40–43% масс. и 60–63% масс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе приведены расчеты и разработана математическая модель процесса формирования слитка, отражающая последовательности кристаллизации и непрерывность питания объемов по высоте, температурное поле составной оболочки из литейного припаса и металлической обечайки. Приведена технологическая цепочка производства опытной отливки из сплава 20X23N18, включающая операции удаления прибыльной и донной частей и механическую обработку припуска по диаметру. Согласно расчетной норме на припуск, токарная обработка по диаметру слитка, до момента фактического удаления поверхностных дефектов составила 4%. Образец жаропрочной стали на никель-хромовой основе, полученный вакуумной индукционной плавкой слитка в цилиндрическую изложницу, после обработки давлением, методом холодного проката по химическому составу и требованиям к механическим свойствам, полностью соответствует марки стали 20X23N18 по ГОСТ 5632-72 «Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки». Получены режимы разработанного способа вакуумно-индукционной плавки жаропрочного сплава 20X23N18.

Предлагаемая нами схема нанесения покрытия комбинированной системы состоит из компонентов (Cr-Al-Co-редкоземельная группа) для работы изделий из жаропрочного сплава при высоких температурах. Формирование покрытий проводилось ионно-плазменным методом. Двухслойное покрытие с внутренним металлическим и внешним керамическим слоями на подготовленной поверхности матрицы жаропрочного сплава содержит: Cr/Al/Co (поочередное нанесение слоев) + $ZrO_2-Y_2O_3$. Общая толщина двухслойного теплозащитного покрытия составила 180–190 мкм.

Исследования проведены в рамках грантового проекта Комитета науки МОН РК «Создание композиционных покрытий для повышения эксплуатационных свойств ответственных узлов промышленного оборудования», 2020–2022 гг., номер проекта AP08053322.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хапонен Н.А., Лисянский А.С. Живучесть турбин вблизи и за пределом паркового ресурса // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – №7. – С.16.
2. Гладштейн В.И. Влияние времени наработки до 350 тыс. часов на служебные характеристики и структуру литых корпусных деталей паровых турбин и арматуры // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2007. - № 2. – С.21-23.
3. Дашуни Н.В., Манилова Е.П., Быбников А.И. Фазово-структурные превращения в 12%-ной хромистой стали ЭП 428 во время длительной эксплуатации рабочих лопаток // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2007. - №1. – С.23-29.

4. Смирнов Б.М. Кластеры с плотной упаковкой // УФН. – 2002. - Т. 162, № 1. - С.119.
5. Garvin R. The commercial emergence of GE Aircraft Engines. – AIAA, 2009, p.134.
6. Langer J.S., Lemaire A. Dynamic model of super-arrhenius relaxation in glassy materials // Phys. Rev. Lett. – 2005. – Vol. 94. – 175701.
7. Gleiter H. Nanocrystalline materials: Basic concepts and microstructure // ActaMaterialia. – 2010. – Vol. 48 (1) - P. 12-17.
8. Ino S. Stability of multiply-twinned particles // J. Phys. Soc. Japan. – 1969. – Vol.27(4). – P. 941.
9. Бульёнков Н.А., Тытик Д.Л. Модульный дизайн икосаэдрических металлических кластеров // Известия АН. – 2011. - № 1. – С.14-18.
10. Абдуллин И. Ш., Миронов М. М., Гребенщикова М. М. и др. Патент RU 2423547 С2. 10.07.2011;
11. Петров, Л.М. Многослойные ионно-плазменные покрытия в тяжело нагруженных узлах трения / Л.М. Петров, А.П. Сычев, П.Г. Иваночкин, Ю.В. Жукова // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2008. – № 8. – С. 65–68.
12. Кривобоков, В.П. Плазменные покрытия (методы и оборудование) / В.П. Кривобоков, Н.С. Сочугов, А.А. Соловьёв. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 104 с.;
13. Чуркин Б. С. Теория литейных процессов: учебник / Б. С. Чуркин, под ред. Э. Б. Гофмана. – Екатеринбург: РГПШУ, 2006. – 453 с.;
14. Зборщик А. М. Специальные виды литья: конспект лекций / А. М. Зборщик. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2007. – 158 с.

КОМПОЗИЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛУЧЕНИЕ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА Ni-Cr С КОМПОЗИЦИОННЫМ ПОКРЫТИЕМ

¹⁾ М.К. Скаков, ²⁾ А.С.М. Жилкашинова, ³⁾ А.В. Градобоев, ²⁾ Ал.М. Жилкашинова, ²⁾ М.Б. Абилов

¹⁾ *Ұлттық ядролық орталық, Курчатов, Қазақстан*

²⁾ *Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен, Қазақстан*

³⁾ *Ұлттық зерттеу Томск политехникалық университеті, Томск, Ресей*

Мақалада никель негізіндегі жылуға төзімді қорытпаның үлгілерін жасау және композициялық жабындыны қолдану әдісі сипатталады. Берілген құрылымды Ni-Cr негізінде (20X23N18) жоғары температуралы қорытпалар алынды. Тәжірибелік құймаларды дайындау келесі операцияларды қамтиды: дайын қорытпаның өлшенген шихта дайындамасын қыздыру; 1600 °С температураға дейін қыздыру және металды вакуумда 10^{-2} – 10^{-4} Па балқыту; үлгіні металдың температурасы 1480–1530 °С температурада қалыпқа құю, қалып температурасы 950–1000 °С. Кристалдану дәйектілігі мен көлемінің биіктік бойынша үздіксіздігін, құрылымдық қабығының температуралық өрісін көрсететін құйма түзілу процесінің есептеулері мен математикалық моделі орындалды. Шығарылған математикалық модель құймаларды жасау кезінде балқыманы воронкаға тұрақты деңгейде құю керек екенін көрсетті: ыстыққа төзімді 20X23N18 қорытпа матрицасының дайындалған бетінде ішкі металл және сыртқы керамикалық қабаттары бар Cr/Al/Co + ZrO₂-Y₂O₃ екі қабатты жабудың ионды-плазмалық технологиясы ұсынылған.

DEVELOPMENT AND STUDY OF TECHNOLOGY FOR OBTAINING A HEAT-RESISTANT Ni-Cr ALLOY WITH A COMPOSITE COATING

¹⁾ M.K. Skakov, ²⁾ As.M. Zhilkashinova, ³⁾ A.V. Gradoboyev, ²⁾ Al.M. Zhilkashinova, ²⁾ M.B. Abilev

¹⁾ *National Nuclear Center, Kurchatov, Kazakhstan*

²⁾ *Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan*

³⁾ *National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

The article describes a method for obtaining samples of a heat-resistant nickel-based alloy, followed by applying a composite coating. Model high-temperature alloys based on Ni-Cr (20Kh23N18) with a given structure have been obtained. Manufacturing of experimental castings included the following operations: heating of the measured charge billet of the finished alloy; heating to a temperature of 1600 °C and melting the metal in a vacuum of 10^{-2} – 10^{-4} Pa; pouring the sample into a mold at a metal temperature of 1480–1530 °C, the mold temperature was 950–1000 °C. Mathematical model of the ingot formation process was calculated, reflecting the crystallization sequence and the continuity of the volume supply along the height, the temperature field of the composite shell, have been performed. The developed mathematical model showed that during the production of ingots, the melt should be poured at a constant level in the funnel. To apply a two-layer coating with inner metal and outer ceramic layers on the prepared surface of the matrix of the heat-resistant 20Kh23N18 alloy: Cr/Al/Co + ZrO₂-Y₂O₃, an ion-plasma technology was proposed.

УДК 574:630:504.054

ARTIFICIAL RADIONUCLIDES IN THE FOREST LITTER AT THE TERRITORY ADJACENT TO SEMIPALATINSK TEST SITE

Ye.S. Syssoyeva, N.V. Larionova, Yu.S. Shevchenko, N.A. Leschenko, A.I. Merkel

Branch "Institute of Radiation Safety and Ecology" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The paper provides results of research of concentration and distribution of artificial radionuclides in the components of forest litter and in the top soil layer of the pine forest of Priirtyshie long after nuclear tests at the territory of Semipalatinsk Test Site (the STS). Minimum and maximum values of specific activity were determined for ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$ in the soils researched as well as in mineral and organic components of litter. Series of radionuclides were formed depending on their ability to be accumulated in the top layer of soil and in the components of forest litter. Dependence between concentrations of ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$ in the litter and its thickness was determined.

Keywords: radioecology, Semipalatinsk Test Site (the STS), artificial radionuclides (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$), forest ecosystem, forest litter.

INTRODUCTION

Semipalatinsk Test Site (STS) – is one of the largest test sites used for testing nuclear weapons in the world. It occupies the area of 18 300 km². For 42 years of operation, 456 nuclear tests using 616 devices were conducted here. The tests conducted at the STS caused contamination not only of the test site territory itself but also, beyond its boundaries. So, as the result of the test of the 29th of August, 1949, territory of pine forest of Priirtyshie suffered contamination (Figure 1).

Processes of radionuclides migration in forest biocenoses have a series of peculiarities comparing with other natural plant communities, due to large area of above-ground phytomass, multi-year cycle of plants development, availability of forest litter and etc. [1].

The main primary absorbers of radionuclides in forest ecosystems include leafage and needles, forest undergrowth, as well as forest litter. Radioactive substances can be flushed off with precipitations, get on soil surface

when leaves fall from the plants, and also, when stalks (of grass, for example) die off. Only moss and lichens can retain radionuclides indefinitely. Therefore, irrespective of season, when the fallout took place, major part of contamination proves to be in the litter [2, 3].

Forest litter is the first soil layer, where radionuclides get accumulated, transformed, and from where their migration starts. In course of time, radionuclides entering the soil litter and top layers of soil get redistributed in such a manner that they enrich the soil layers below with mobile compounds. At that, decomposing forest litter serves as a potential source of mobile forms of radionuclides that enter soil [4, 5].

The aim of this research is to study composition and distribution of artificial radionuclides (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$) in forest litter and in the top soil layer of pine forest of Priirtyshie long after the nuclear tests at the STS territory.

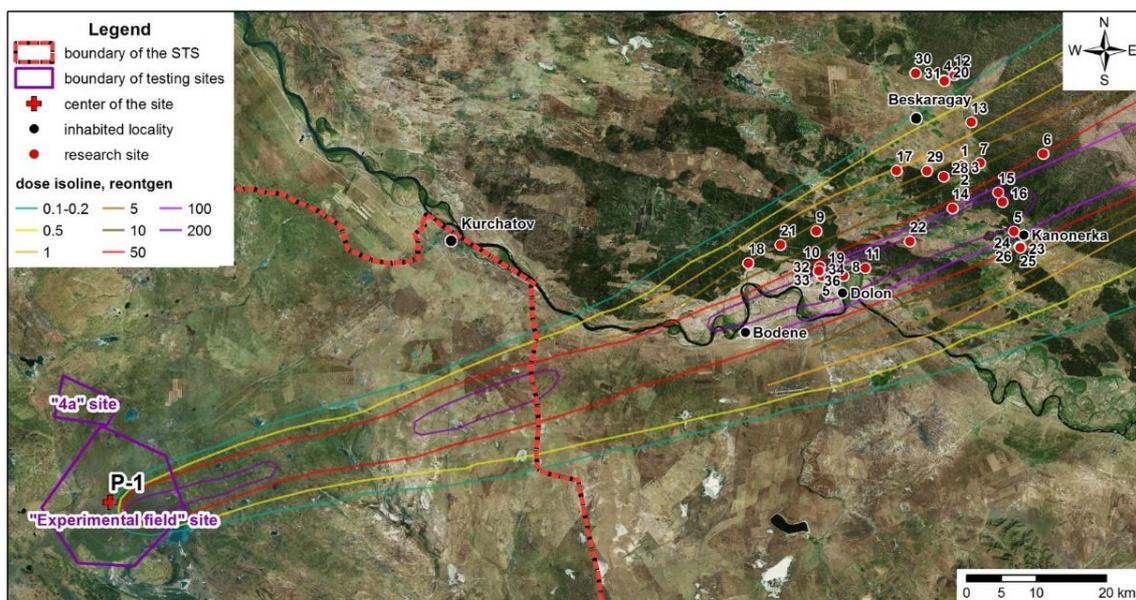


Figure 1. Study area

MATERIALS AND METHODS

As the research areas, forest plots within the plume of the 1949, with presumably increased concentrations of radionuclides in the environmental components were chosen. In total 36 research areas were arranged (Figure 1). From each site, samples of litter and mixed samples of soil were taken to the depth of 5cm using envelope method.

Litter was dried under natural conditions. After that, to separate organic components from mineral components, the sample was sieved through a 2 mm mesh. Organic component was charred until black residue, milled using laboratory mill to reach homogenous mass. After that, specimens were placed into crucibles for further ashing. Initial temperature was increased to 200 °C for 50–60 minutes, after that the maximum temperature of muffle furnace was set as follows: ashing temperature for further determination of ¹³⁷Cs is 400 °C, while for ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am and ²³⁹⁺²⁴⁰Pu it's up to 550 °C.

Samples were dried to the air-dry state in drying cabinets at the temperature of 50–60 °C. After coarse stones and inclusions (plant residues) were removed, dried samples were weighed using counterbalance. Then the entire soil mass was carefully mixed, ground in a mortar of porcelain using pestle and sieved using a 1 mm mesh. To check whether the whole amount of sample was sieved, or not, each sieve was shaken above a sheet of paper.

Analyses to measure activity concentrations of radionuclides in samples were conducted in accordance to GOST guidelines with a certified laboratory equipment [6–7]. Activity concentrations of ¹³⁷Cs and ²⁴¹Am were determined with a γ -spectrometer *Canberra GX-2020*, ⁹⁰Sr and ²³⁹⁺²⁴⁰Pu were determined using a radiochemical isolation followed by measuring with a β -spectrometer *TRI-CARB 2900 TR* and α -spectrometer *Canberra (mod. 7401)*, respectively. The bias for ¹³⁷Cs and ²⁴¹Am did not exceed 10-20%, for ⁹⁰Sr – 15-25%, for ²³⁹⁺²⁴⁰Pu – 30%.

RESULTS AND DISCUSSION

Ranges of values as well as the arithmetic mean and its error of activity concentration of ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu in components of the forest floor (organic and mineral constituent) and the top soil are listed in the table.

It was found that maxima of the activity concentration are characteristic of ¹³⁷Cs (up to 370 Bq/kg) and ²³⁹⁺²⁴⁰Pu (up to 370 Bq/kg), lower concentrations are characteristic of ⁹⁰Sr (up to 190±30 Bq/kg), the content of ²⁴¹Am does not exceed 19±2 Bq/kg.

Based upon the in vitro analysis, it was found that activity concentrations of radionuclides are on average higher in the forest floor than in soil: the fate of the content of radionuclides was 71% in the floor (39% in the organic and 32% in the mineral constituent) and 29% in soil. The distribution of radionuclides among components of the forest floor and top soil is provided as histograms (Figure 2).

The minimum activity concentration in components of the forest floor and top soil is observed for ²⁴¹Am, the higher content was found for ²³⁹⁺²⁴⁰Pu and ⁹⁰Sr, maxima are characteristic of ¹³⁷Cs. At the same time, the range of activity concentration values in the organic part of the floor for ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr and ²⁴¹Am is on average two orders of magnitude, for ²³⁹⁺²⁴⁰Pu – three orders of magnitude; in the mineral constituent of the floor for ⁹⁰Sr and ²⁴¹Am is on average different by one order of magnitude, for ¹³⁷Cs and ²³⁹⁺²⁴⁰Pu – two orders of magnitude; in the top soil, differences in ranges of activity concentration values average one order of magnitude for ²⁴¹Am and ⁹⁰Sr, two orders of magnitude for ¹³⁷Cs and three orders of magnitude for ²³⁹⁺²⁴⁰Pu.

Based on data obtained, a series according to the accumulation degree of ¹³⁷Cs was arranged: the mineral constituent of the floor > top soil > organic part of the floor. The cause of the low vertical migration of ¹³⁷Cs is that it is tightly fixed in the soil absorbing complex. A lot of literature data on most of forest soils proves that the radionuclide is mostly accumulated in the lower layer of the forest floor or in top soil, which is proved by the data obtained in the course of research.

Table. Activity concentrations of artificial ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu in components of the forest floor and the top soil

Components under study	Activity concentrations of radionuclides, Bq/kg *)			
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	²⁴¹ Am	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu
Organic part of the floor	$\frac{42 \pm 13}{1,1 - 370 (n - 33)}$	$\frac{30 \pm 7}{1,4 - 190 (n - 33)}$	$\frac{3 \pm 1}{0,3 - 19 (n - 21)}$	$\frac{34 \pm 16}{0,3 - 320 (n - 31)}$
Mineral part of the floor	$\frac{63 \pm 15}{2,7 - 350 (n - 32)}$	$\frac{12 \pm 2}{1,4 - 48 (n - 21)}$	$\frac{3 \pm 1}{0,9 - 9,7 (n - 19)}$	$\frac{66 \pm 28}{1,9 - 370 (n - 21)}$
Top soil	$\frac{36 \pm 5}{4,3 - 120 (n - 31)}$	$\frac{17 \pm 4}{1,1 - 71 (n - 25)}$	$\frac{2 \pm 0,3}{0,5 - 5,1 (n - 20)}$	$\frac{33 \pm 10}{0,7 - 240 (n - 28)}$

*) In the numerator – arithmetic mean, error of the arithmetic mean; in the denominator – the minimum and maximum activity concentration; n – the number of test samples

**ARTIFICIAL RADIONUCLIDES IN THE FOREST LITTER AT THE TERRITORY
ADJACENT TO SEMIPALATINSK TEST SITE**

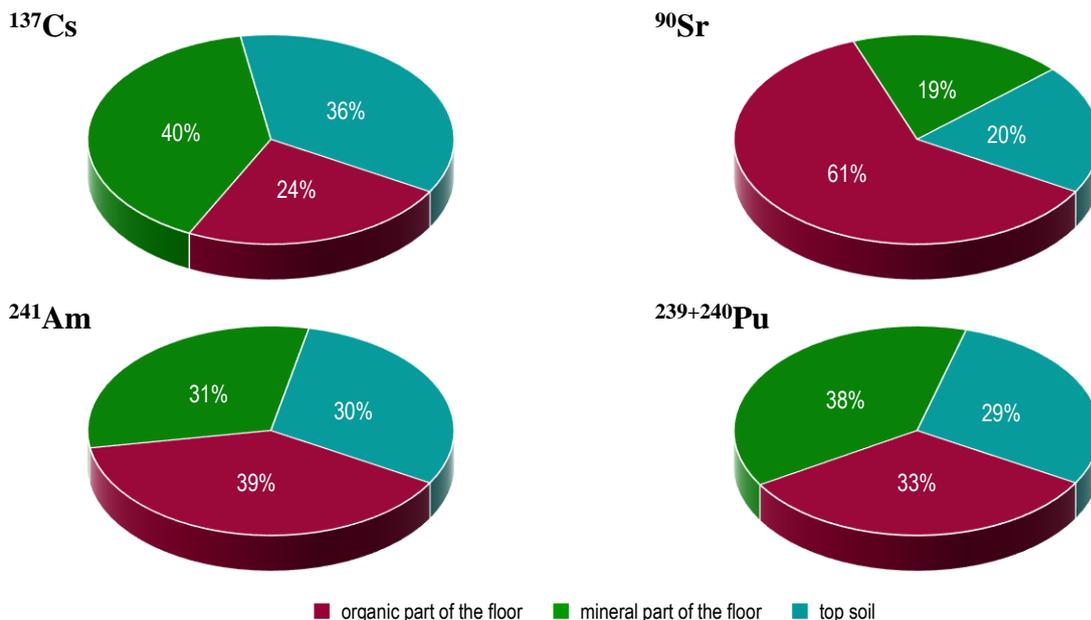


Figure 2. The average content of ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am and ²³⁹⁺²⁴⁰Pu in components of the forest floor and top soil

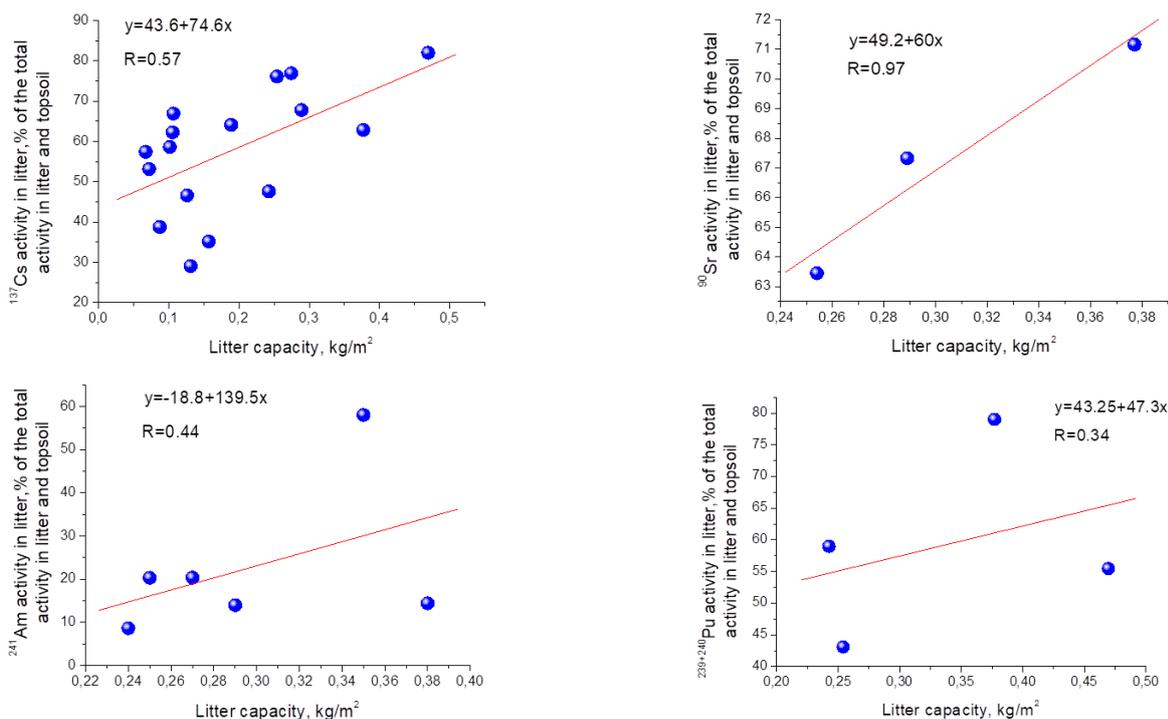


Figure 3. A variation in the inventory of radionuclides in the floor depending on its thickness

⁹⁰Sr behaves different, the series of which according to the accumulation degree appears as follows: the organic part of the forest floor > top soil > mineral constituent of the forest. It is known that most of ⁹⁰Sr in natural components are oftentimes in mobile forms (water-soluble and exchangeable). A high index of easily accessible form of ⁹⁰Sr defines its intensive migration ability, which indicates its higher mobility and, consequently, a higher biological availability for plants. This can explain an intensive accumulation of ⁹⁰Sr in the

organic part of the floor.

For radionuclides of the transuranic series, the following series according to the accumulation degree were arranged: for ²⁴¹Am: the mineral constituent of the forest floor > the organic part of the floor > top soil; for ²³⁹⁺²⁴⁰Pu: the organic part of the floor > the mineral constituent of the floor > top soil. As a result, research undertaken, it was found that the major inventory of transuranic elements (²⁴¹Am, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu) is contained in the floor. At the same time, most of ²⁴¹Am, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu is

incorporated in slightly-soluble complex compounds, which explains their low mobility and accumulation in the organic and mineral constituent of the floor.

A special role of the forest floor in accumulation processes of radioactive substances is largely defined by its structure and thickness – the weight of the floor per unit area. The average thickness of the floor for the territory of interest is 0.25 kg/m². A variation in the inventory of radionuclides in the floor depending on its thickness is listed in graphs (Figure 3).

As you see from the graphs provided, an increase of the accumulation of radionuclides in the forest floor is observed as its thickness increases, which, in turn, proved a special role of the floor in accumulation and distribution processes of radionuclides in the forest floor as a whole.

CONCLUSION

As a result of the researches conducted, concentrations of ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am and ²³⁹⁺²⁴⁰Pu in the top layer of soil as well as in mineral and in organic components of litter were determined. The maximum values of specific

activity were registered for ¹³⁷Cs (up to 370 Bq/kg) and ²³⁹⁺²⁴⁰Pu (up to 370 Bq/kg), lower concentrations were registered for ⁹⁰Sr (up to 190±30 Bq/kg). Concentration of ²⁴¹Am did not exceed 19±2 Bq/kg.

Based on the study of radionuclide distribution in the top soil and components of the forest floor, series were arranged according to accumulation abilities of radionuclides: ¹³⁷Cs: the mineral constituent of the floor > top soil > the organic part of the floor; ⁹⁰Sr: the organic part of the floor > top soil > the mineral constituent of the floor; ²⁴¹Am: the mineral constituent of the floor > the organic part of the floor > top soil; ²³⁹⁺²⁴⁰Pu: the organic part of the floor > the mineral constituent of the floor > top soil. It was also found that the activity concentration of radionuclides in on average higher in the forest floor than in soil: the fate of the content of radionuclides was 71% in the floor (39% in the organic and 32% in the mineral constituent) and 29% in soil. At the same time, an increase in the accumulation of radionuclides by the forest floor depends on its thickness.

LITERATURE

1. Krasnov V.P., Orlov A.A., Buzun V.O. et al. Applied forest radioecology. Zhitomir: Volyn, 2007. p. 680.
2. Dvornik A.M. Radioecological assessment of forest ecosystems after nuclear accidents: methodology, simulation, prediction: Ph.D. thesis (Biology): 06.03.03. Gomel: IL NANB, 1998. p. 40.
3. Scheglov A. I. Biogeochemistry of artificial radionuclides in forest ecosystems: Based on results of 10-year research in the Chernobyl accident impact zone. – M.: Science, 2000. – p. 268
4. Perevolotskiy A.N. Distribution of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in forest biocenoses: Gomel: RNIUP Institute of Radiology, 2006. p. 255.
5. Kulikov N.V., Molchanova I.V., Karavayeva E.N. Radioecology of land cover. – Sverdlovsk: UrD AS USSR, 1990. – p. 172.
6. Activity of radionuclides in large-volume samples. A measurement procedure with a gamma-spectrometer MI 2143-91: MI 5.06.001.98 RK. - Almaty, 1998. – p. 18.
7. A procedure to determine the content of plutonium-(239+240), strontium-90 artificial radionuclides in environmental objects (soil, ground, bottom sediments and plants). - Almaty, 2010. – p. 25.

СЕМЕЙ СЫНАҚ ПОЛИГОНЫНА ІРГЕЛЕС АУМАҚТАҒЫ ОРМАН ТӨСЕМІНДЕГІ ЖАСАНДЫ РАДИОНУКЛИДТЕР

Е.С. Сысоева, Н.В. Ларионова, Ю.С. Шевченко, Н.А. Лещенко, А.И. Меркель

ҚР ҰҰО РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатова, Қазақстан

Мақалада Семей сынақ полигоны (ССП) аумағындағы ядролық сынақтардан кейінгі алыс кезеңдегі Ертіс маңындағы қарағайлы орманның беткі топырақ қабаты мен орман төсемінің құрауыштарындағы жасанды радионуклидтердің құрамы мен таралуын зерттеу нәтижелері ұсынылған. Зерттеліп жатқан топырақтарда, сондай-ақ төсемнің минералды және органикалық құрауыштарындағы ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu меншікті белсенділігінің минималды және максималды мәндері анықталды. Радионуклидтердің беткі топырақ қабатында және орман төсемінің құрауыштарында жинақталу қабілеті бойынша қатарлары қалыптастырылған. Орман төсемінің құрауыштарындағы ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu радионуклидтерінің құрамы мен оның қуаты арасында байланыс орнатылды.

Түйінді сөздер: радиоэкология, Семей сынақ полигоны (ССП), жасанды радионуклидтер (¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu), орман экожүйесі, орман төсеміші.

**ИСКУССТВЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ В ЛЕСНОЙ ПОДСТИЛКЕ НА ТЕРРИТОРИИ,
ПРИЛЕГАЮЩЕЙ К СЕМИПАЛАТИНСКОМУ ИСПЫТАТЕЛЬНОМУ ПОЛИГОНУ**

Сысоева Е.С., Ларионова Н.В., Шевченко Ю.С., Лещенко Н.А., Меркель А.И.

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В статье представлены результаты исследования содержания и распределения искусственных радионуклидов в компонентах лесной подстилки и верхнем почвенном слое соснового бора Прииртышья, в отдаленный период после ядерных испытаний на территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП). Определены минимальные и максимальные значения удельной активности ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$ в исследуемых почвах, а также в минеральной и органической составляющей подстилки. Сформированы ряды радионуклидов по их способности к накоплению в верхнем почвенном слое и компонентах лесной подстилки. Установлена зависимость между содержанием радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$ в компонентах лесной подстилки и ее мощностью.

Ключевые слова: радиоэкология, Семипалатинский испытательный полигон (СИП), искусственные радионуклиды (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$), лесная экосистема, лесная подстилка.

УДК 621.039.587

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЛЯ ИМИТАЦИИ ОСТАТОЧНОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В КОРИУМЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ЖАРОПРОЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

^{1,2)} Толеубеков К.О., ²⁾ Акаев А.С., ²⁾ Бекмулдин М.К.

¹⁾ Государственный университет им. Шакарима, Семей, Казахстан

²⁾ Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

E-mail: toleubekov@nnc.kz

Одной из особенностей кориума является наличие остаточного энерговыделения. В качестве метода физического моделирования остаточного тепловыделения на установке ЛАВА-Б применяется метод индукционного нагрева. Статья посвящена индукционному нагреву кориума при проведении экспериментальных исследований его взаимодействия с жаростойкими материалами на установке Лава-Б. В статье представлены результаты анализа параметров, влияющих на эффективность системы индукционного нагрева, и определены оптимальные условия для увеличения мощности и эффективности имитации остаточного энерговыделения. В результате проделанной работы сделаны выводы об необходимых условиях повышения энерговыделения в кориуме и эффективности индукционного нагрева как метода физического моделирования остаточного энерговыделения в кориуме.

Ключевые слова: кориум, индуктор, индукционный нагрев, остаточное энерговыделение, оптимизация.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время становятся актуальными исследования по изучению взаимодействию кориума с жаростойкими материалами, которые могут быть использованы для защитного покрытия подреакторной ловушки расплава. Экспериментальные и теоретические исследования позволят провести обоснованный выбор оптимального жаростойкого материала, предназначенного для повышения безопасности локализации расплава конструкционных элементов ядерного реактора, в случае тяжелой аварии с расплавлением активной зоны и проплавлением корпуса реактора [1].

В рамках работ по изучению взаимодействия кориума с жаропрочными материалами необходимо учитывать остаточное энерговыделение, вызванное протеканием реакций распада продуктов деления урана, распада актиноидов, излучения от конструкционных материалов и деления топлива нейтронами.

Установка ЛАВА-Б, эксплуатируемая филиалом «Институт атомной энергии» Республиканского государственного предприятия «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», позволяет проводить исследование взаимодействия расплава кориума с огнеупорными материалами с имитацией остаточного энерговыделения в бетонной ловушке. В качестве метода физического моделирования остаточного тепловыделения на установке ЛАВА-Б применяется метод индукционного нагрева, заключающийся в бесконтактном нагреве электропроводящих материалов токами высокой частоты и большой величины.

Явным преимуществом индукционного нагрева кориума является бесконтактный способ передачи энергии в расплав. Если удастся разработать специальный комплекс мер, обеспечивающих достаточную равномерность и высокое энерговыделение, то

данный вид нагрева будет являться более предпочтительным в сравнении с другими способами имитации остаточного энерговыделения.

Поэтому при дальнейших исследованиях взаимодействия кориума с тугоплавкими материалами методом индукционного нагрева необходимо провести анализ факторов, влияющих на его эффективность. Повышение эффективности индукционного нагрева позволят расширить возможности исследования поведения кориума и его взаимодействия с различными материалами, тем самым повысив уровень безопасности эксплуатации АЭС.

Таким образом, данная работа посвящена анализу факторов, влияющих на эффективность системы индукционного нагрева при имитации остаточного энерговыделения в кориуме при взаимодействии с жаропрочными материалами.

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НАГРЕВА

Одним из способов повышения электрического КПД индуктора является подбор оптимальных электромагнитных и геометрических параметров в соответствии с теорией индукционных установок [2–4]. Для создания возможности оптимизации конструкции индуктора, необходимо рассмотреть степень влияния различных факторов на эффективность индукционного нагрева.

На величину электрического КПД значительное влияние оказывают частота переменного тока, геометрические размеры индуктора, материал индуктора и загрузки, напряжение, подаваемое на индуктор и т. д., поэтому при проектировании индукционной установки необходимо учитывать множество факторов, часто пересекающиеся между собой, что значительно усложняет получение установки индукционного на-

грева высокой эффективности. Для оптимизации электромагнитных и геометрических параметров индуктора был проведен литературный обзор по устройству индукционных нагревательных установок и проблемах повышения их эффективности. Также были проведены оценочные расчеты для корректирования некоторых зависимостей в условия данной нам задачи.

Экспериментальная установка состоит из двух основных блоков: электроплавильная печь (ЭПП) для плавления прототипа кориума, и устройство приема расплава (УПР), в которую сливается прототип кориума после полного расплавления. Внешний вид экспериментальной установки ЛАВА-Б представлен на рисунке 1.



Рисунок 1. Внешний вид установки «ЛАВА-Б»

Кориум, в состав которого входит диоксид урана, двуокись циркония, цирконий и сталь с общей массой до 60 кг, плавится в электроплавильной печи (ЭПП), а затем сливается в ловушку расплава, которая размещена в устройстве приема расплава (УПР). Для имитации остаточного энерговыделения в расплаве применяется метод индукционного нагрева. Схема нагрева расплава с помощью индуктора приведена на рисунке 2.

Расчет параметров индуктора был проведен для различных вариантов индуктора и бетонной ловушки, которые отличаются следующими параметрами: числом витков, высотой индуктора, частотой источника питания, а так же напряжением на индукторе.

Одним из основных параметров, характеризующим работу индукционной установки является час-

тота тока, определяющая глубину проникновения электромагнитной волны в материал загрузки, то есть так называемый скин-эффект, в котором выделяется от 70 до 85% тепла от общего тепловыделения.

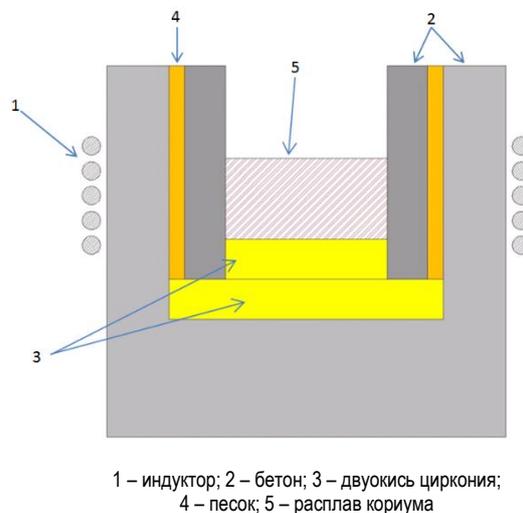


Рисунок 2. Схема нагрева имитатора расплава

Как видно из рисунка 3, по мере увеличения частоты тока происходит уменьшение глубины проникновения тока в расплав. То есть, с точки зрения имитации остаточного энерговыделения для ее приближения к реальному процессу, выгоднее всего использовать низкие частоты для сквозного нагрева расплава, однако существует ряд негативных моментов, которые исключают возможность использования низких частот.

Так, на рисунке 4 мы видим, что при использовании низких частот тока отмечаются низкие значения КПД, возрастающие по мере увеличения частоты тока, а также высокой реактивной мощности, возникающей в индукторе, компенсация которой производится конденсаторами значительной емкости. На графике видно, что приемлемые значения КПД и емкости конденсаторных батарей, требуемых для компенсации реактивной мощности, начинаются при использовании средних частот.

В таблице приведены результаты расчета параметров индукционной системы для трех различных вариантов индуктора, которые отличаются следующими параметрами: числом витков и высотой индуктора, а так же напряжением на индукторе. В качестве основной частоты тока рассматривалось значение 2400 Гц. Расчет проводился на основе литературных источников [4–7].

Согласно таблице, увеличение напряжения тока индуктора не приводит к существенному изменению КПД индуктора, однако можно заметить, что КПД индукторов с большей высотой и количеством витков незначительно выше, чем у индукторов меньших размеров.

Также данные таблицы показывают, что КПД всей индукционной установки чувствителен к изме-

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЛЯ ИМИТАЦИИ ОСТАТОЧНОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В КОРИУМЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ЖАРОПРОЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

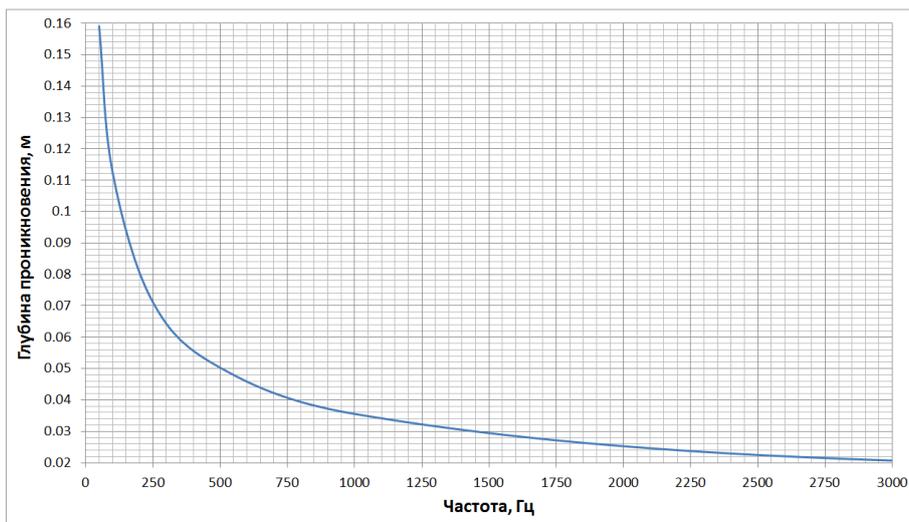


Рисунок 3. Зависимость глубины проникновения тока в расплав кориума от частоты источника тока

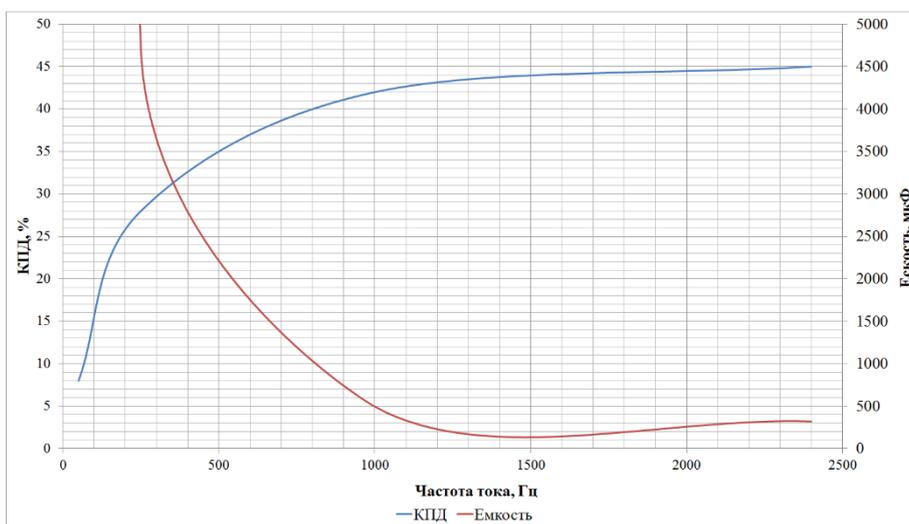


Рисунок 4. Зависимость КПД индуктора и емкости конденсаторов от частоты источника тока

Таблица. Параметры индукционной установки

Параметр	I	II	III	IV	V	VI
Частота источника питания, Гц	2400	2400	2400	2400	2400	2400
Глубина проникновения тока в расплав, мм	23	23	23	23	23	23
Число витков, шт.	10	8	5	10	8	5
Высота индуктора, м	0,4	0,32	0,24	0,4	0,32	0,24
Электрический КПД индуктора, %	46	44	43	45	43	40
Емкость конденсаторной батареи, мкФ	315	282	223	173	154	121
Общий КПД установки, %	35	32	25	31	26	15
Напряжение на индукторе, В	1000	1000	1000	1350	1350	1350

нению напряжения тока. Так, на рисунке 5 представлена зависимость общего КПД установки от напряжения, подаваемого на индуктор, при частоте источника 2400 Гц для нескольких вариантов индуктора. Зависимость инд.1 соответствует варианту индуктора высотой 0,4 м с 10 витками. Зависимости инд.2 и инд.3 относятся к индукторам с высотой 0,32 м и 0,24 м соответственно.

На рисунке 5 видно, что общий КПД установки уменьшается при увеличении напряжения индуктора. Также можно заметить, что индукторы с большей высотой и количеством витков имеют больший КПД, следовательно, выгоднее всего использовать более низкие напряжения и использовать индукторы с большей высотой и количеством витков для более эффективного индукционного нагрева. Однако также

необходимо учитывать реактивную мощность, возникающую в индукторе. Компенсация реактивной мощности осуществляется использованием специальных компенсирующих конденсаторных батарей. На рисунке 6 показана зависимость величины требуемой емкости конденсаторных батарей от напряжения тока.

Из рисунка 6 видна обратная ситуация. При увеличении напряжения индуктора уменьшается емкость конденсаторов, необходимых для компенсации реактивной мощности. Следовательно, выгоднее всего использовать более высокие напряжения и использовать индукторы с меньшей высотой и количеством витков для снижения реактивной мощности в цепи, так как индукторы с большей высотой и количеством витков должны обладать большой емкостью конденсаторных батарей по сравнению с индукторами меньших геометрических параметров.

Зачастую при проведении эксперимента необходимо, чтобы в расплаве выделялось определенное количество тепла. Удельная энергосодержание в расплаве зависит от множества факторов. Одним из этих факторов является электрический КПД индуктора. Электрический КПД индуктора зависит от множества параметров: отношение диаметров индуктора и расплава, относительная длина индуктора, и других факторов [2].

Согласно теории индукционных установок, индуктор по возможности необходимо располагать как можно ближе к заготовке, что приводит к увеличению КПД индуктора, за счет уменьшения рассеивания магнитного поля. Однако подобное соотношение не соответствует большинству практических случаев, в силу наличия, технологического зазора или материалов бетонной ловушки в условиях нашей задачи.

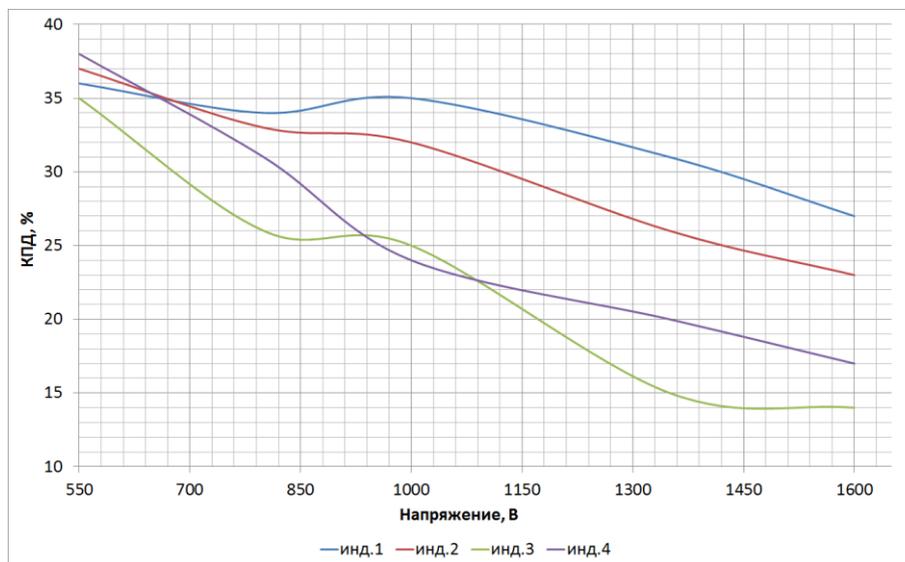


Рисунок 5. Зависимость КПД установки от напряжения индуктора

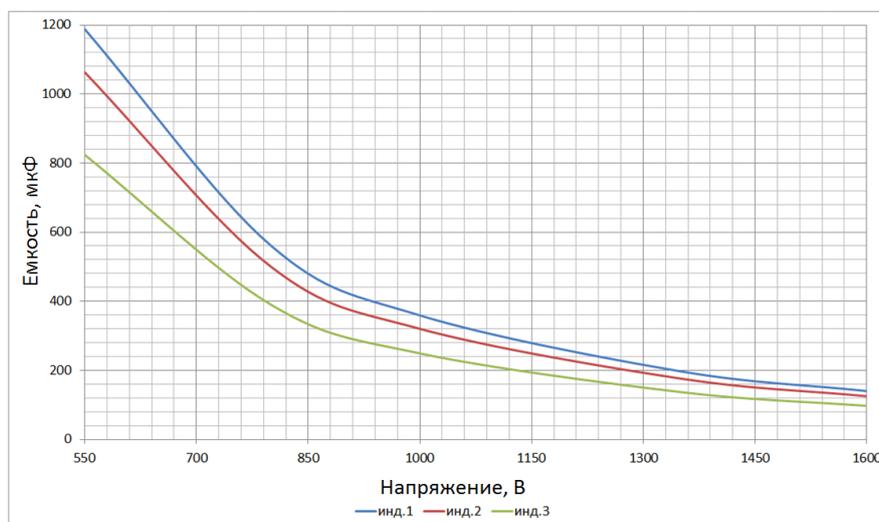


Рисунок 6. Зависимость емкости конденсаторов от напряжения индуктора

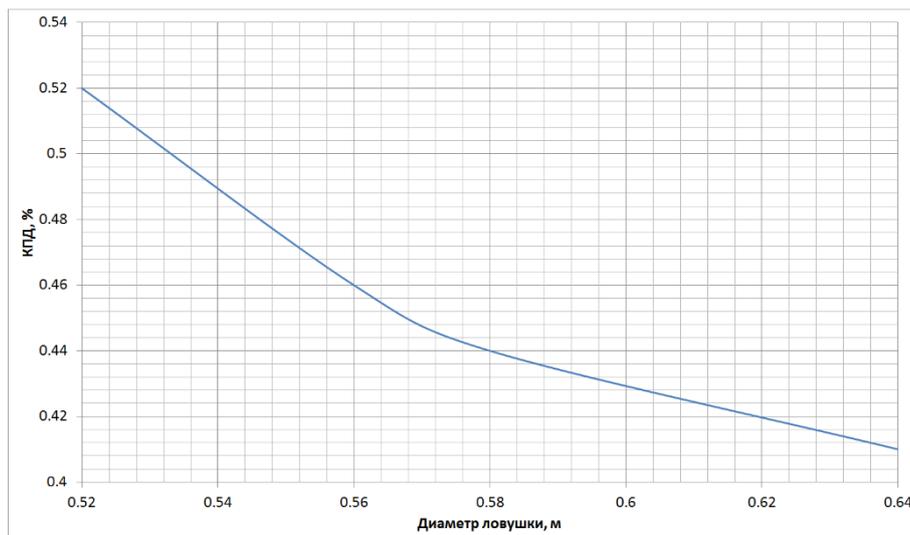


Рисунок 7. Зависимость КПД индуктора от диаметра ловушки

Так, на рисунке 7 показана зависимость КПД индуктора от диаметра расплава ловушки. Индуктор с 10 витками имеет высоту 0,4 м. Можно заметить, что при уменьшении диаметра ловушки, т. е. расстояния между индуктором и расплавом, происходит увеличение КПД индуктора и, следовательно, энерговыделение в расплаве.

Оптимально подобранные геометрические параметры ловушки и индуктора позволят увеличить эффективность индукционного нагрева. Можно констатировать тот факт, что индукционный нагрев носит сложный характер, эффективность которого зависит от множества факторов, часто оказывающих влияние друг на друга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе работы выполнен анализ параметров, влияющих на эффективность системы индукционного нагрева для имитации остаточного энерговыделения в кориуме при взаимодействии с жаропрочными материалами.

Выполнен расчет параметров системы «индуктор-расплав» для различных вариантов индуктора, которые отличаются следующими параметрами: числом витков, высотой индуктора, а так же напряжением на индукторе. В результате расчета можно сделать следующие выводы:

– при использовании низких частот будет наибольшая глубина проникновения тока в материал загрузки. Это свойство обеспечит прогрев расплава по всему объему, с точки зрения имитации остаточного энерговыделения, использование данных частот более приемлемо, однако использование данной частоты отличает низкий КПД и высокие значения реактивной мощности индуктора, на компенсацию которых требуются конденсаторные батареи большей емкости. Эти значения емкости батарей значительно выше имеющихся технологических возможностей,

поэтому наиболее оптимальной частотой источника тока являются средние частоты;

– увеличение напряжения тока в индукторе приводит к незначительному уменьшению электрического КПД индуктора, и довольно таки значительно снижению общего КПД установки. Также можно отметить, что при увеличении высоты индуктора и количества витков происходит увеличение КПД индуктора;

– с увеличением напряжения тока индуктора уменьшается емкость конденсаторов, необходимых для компенсации реактивной мощности. Замечено, увеличение высоты индуктора и количества витков приводит к увеличению реактивной мощности, что соответственно приводит к необходимости использования конденсаторов большей емкости;

– с уменьшением расстояния между расплавом и индуктором увеличивается мощность, вкладываемая в расплав, вследствие повышения КПД индуктора.

Таким образом, для увеличения энерговыделения в расплаве и повышения эффективности индукционного нагрева как метода имитации остаточного энерговыделения в кориуме необходимо:

1) Изготовить ловушку расплава с минимально возможным диаметром камеры приема расплава. Увеличение диаметра камеры приема расплава, наряду с поверхностным эффектом проникновения вглубь материалов проводящей среды, приведет к тому, что вся энергия в расплаве будет выделяться на боковой поверхности расплава, что не соответствует самой сути имитации остаточного энерговыделения;

2) Уменьшить расстояние между индуктором и расплавом. Увеличение расстояния между нагреваемым элементом и индуктором приводит к уменьшению эффективности энерговыделения в расплаве;

3) Использовать индуктор, высота которого превышает высоту расплава.

Таким образом, представленный выше анализ позволяет сделать вывод о возможности использования и повышения эффективности индукционного нагрева

как метода имитации остаточного энерговыделения в корииуме только за счет оптимизации геометрических параметров индуктора и бетонной ловушки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самойлов О.Б., Усынин Г.Б., Бахметьев А.М. Безопасность ядерных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Злотников И.И., Захаров И.В. Повышение эффективности работы устройств для индукционного нагрева // Электротехника и энергетика. – 2015. – С. 53–59.
3. Захаров И.В. Анализ факторов, воздействующих на реактивную мощность цилиндрической системы «индуктор-загрузка» // Наука и техника Казахстана. – 2001. – Вып. 2. – С. 165–173
4. Л.И. Иванова, Л.С. Грובהва, Б.А. Сокунов, С.Ф. Сарапулов Индукционные тигельные печи: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. // Екатеринбург: Изд-во УГТУ – УПИ, 2002, 87 с.
5. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977.
6. Ю.Е. Шелудяк, Л.Я. Кашпоров Теплофизические свойства компонентов горючих систем. Справочник. Москва, 1992.
7. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники, М.: Атомиздат, 1968.

ҚЫЗУҒА ТӨЗІМДІ МАТЕРИАЛДАРМЕН ӘРЕКЕТТЕСУ КЕЗІНДЕ КОРИУМДАҒЫ ҚАЛДЫҚ ЭНЕРГИЯ БӨЛІНУДІ ҮЛГІЛЕУ ҮШІН ИНДУКЦИЯЛЫҚ ЖЫЛЫТУ ЖҮЙЕСІНІҢ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ

^{1,2)} К.О. Толеубеков, ²⁾ А.С. Акаев, ²⁾ М.К. Бекмулдин

¹⁾ *Шәкәрім атындағы Семей мемлекеттік университеті, Семей, Қазақстан*
²⁾ *ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан*

Кориумның ерекшеліктерінің бірі қалдықты энергияның бөлуінің бар болуы. Лава-Б қондырғысында қалдықты энергия бөледі физикалық моделдеу әдісі ретінде индукциялық қыздыру әдісі қолданылады. Мақала Лава-Б қондырғысында корииумның ыстыққа тұрақты материалдармен өзара әсеріне тәжіртбелік зерттеулерді жүгізу кезінде оны индукциялық қыздыруға арналған. Мақалада индукциялық қызу жүйесінің тиімділігіне әсер ететін параметрлерді талдау нәтижелері берілген және қалдықты энергия бөледі еліктеу қуаты мен тиімділігін арттыруға арналған тиімді жағдай анықталды. Жүргізілген жұмыстың нәтижесінде корииумда энергия бөлінуі және корииумда қалдықты энергияның бөлінуін физикалық моделдеу әдісі ретінде индукциялық қыздыру тиімділігін арттырудың қажетті жағдайлары туралы кейбір қорытындылар жасалды.

Түйінді сөздер: корииум, индуктор, индукциялық қызу, қалдықты энергия бөлу, тиімдеу.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE INDUCTION HEATING SYSTEM FOR IMITATION THE RESIDUAL ENERGY RELEASE IN THE CORIUM DURING THE INTERACTION WITH HEAT-RESISTANT MATERIALS

^{1,2)} K.O. Toleubekov, ²⁾ A.S. Akaev, ²⁾ M.K. Bekmuldin

¹⁾ *Semey State University named after Shakarim, Semey, Kazakhstan*
²⁾ *Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

One of the features of corium is the presence of residual energy release. Induction heating is used as a method for physical modeling of residual energy release at the LAVA-B installation. The article is devoted to the induction heating of corium during experimental studies of its interaction with heat-resistant materials at the Lava-B installation. The results of the analysis of parameters that affect the efficiency of the induction heating system, and determine the optimal conditions for increasing the power and efficiency of simulation of residual energy release are presented. As a result of this work, some conclusions are made about the necessary conditions for increasing energy release in corium and the efficiency of induction heating as a method of physical modeling of residual energy release in corium.

Keywords: corium, inductor, induction heating, residual energy, optimization.

УДК 621.039:621.798

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ СТЕНДОВОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ УПАКОВОЧНЫХ КОМПЛЕКТОВ

Давыденко Д.И., Коровиков А.Г., Поспелов В.А.

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

E-mail: davydenko@nnc.kz

В связи с отсутствием в Республике Казахстан (РК) организации, осуществляющей испытания транспортно-упаковочных комплектов (ТУК) в процессе выполнения работ, связанных с обращением с радиоактивными отходами (РАО), отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) и ядерными материалами (ЯМ), предприятия Казахстана испытывают трудности в отношении получения разрешений на использование ТУК различного назначения. На сегодняшний день данная задача решается одним из следующих способов:

– сертификаты-разрешения на конструкции ТУК оформляются за рубежом и после их получения на территории страны, выдавшей сертификат, производится распространение действия сертификатов-разрешений на территорию РК;

– освобождение ТУК от предъявляемых требований нормативно-правовых актов (НПА). Данное решение не всегда применимо, так как ограничивает количество перевозимого материала (например, масса делящегося материала в одном ТУК не более 400 грамм, при условии, если каждая отдельная упаковка в ТУК содержит не более 15 грамм делящегося ЯМ) и применима не ко всем перевозимым материалам.

При наличии собственной базы испытаний ТУК, Казахстан освободится от необходимости в зарубежной помощи по сертификации ТУК. Стендовый комплекс (лаборатория) позволит создать условия по замыканию процесса производства ТУК в Казахстане и создаст конкуренцию на рынке данных услуг в мире.

Ключевые слова: транспортно-упаковочный комплект, сертификат-разрешение, стендовый комплекс, ядерные материалы, радиоактивные вещества, испытания, оборудование.

ВВЕДЕНИЕ

С развитием за последние десятилетия научно-технических связей и экономического взаимодействия в мировой атомной отрасли увеличился объем перемещаемого радиоактивного материала. На сегодняшний день транспортировка различных видов радиоактивных материалов, является очень важной для развития атомной отрасли, как в стране, так и в мире. Ежедневно по всему миру перемещаются тысячи грузов радиоактивных материалов, в том числе РАО и ОЯТ. При этом перевозка радиоактивных материалов сопряжена с риском возникновения аварийных ситуаций, связанных с транспортными или погрузочными средствами, воздействием на упаковки разрушающих механических и тепловых нагрузок в процессе перевозки, радиологические последствия которых могут повлиять на жизнь и здоровье людей и привести к загрязнению окружающей среды. Поэтому во всем мире большое внимание уделяется обеспечению ядерной и радиационной безопасности, а также обеспечению ядерной физической безопасности при транспортировании радиоактивных материалов, на всех стадиях ядерного топливного цикла: от перевозки урановых концентратов и новых топливных сборок, до перевозки РАО и ОЯТ для хранения или захоронения. Безопасность при транспортировании радиоактивных материалов обеспечивается соблюдением ряда требований, обозначенных в нормативно-технических документах в области перевозок радиоактивных грузов. Эти документы имеют важное значение для регулирующих органов, предпри-

ятий, осуществляющие обращение с радиоактивными материалами, перевозчиков и персонала, занятого на погрузочно-разгрузочных работах. Область применения документов, регламентирующих перевозки, включает вид транспорта, будь то автомобильный, железнодорожный, водный или воздушный, используемый при транспортировании радиоактивных материалов, проектирование и структуру транспортных упаковок, категоризацию материалов, документацию, этикетки, маркировку контейнеров и другие аспекты.

Важным условием обеспечения безопасности при перевозке радиоактивных материалов является соответствие потенциальной опасности содержимого упаковки степени ее прочности, надежности и защитных свойств. Выполнение этого условия достигается путем определения правилами видов перевозимых радиоактивных материалов, установления соответствующих требований к характеристикам и методам испытаний упаковочных комплектов. В случае, если ТУК удовлетворяет предъявляемым требованиям и проходит все необходимые испытания, его конструкция утверждается уполномоченным органом – ТУК получает сертификат.

Исходя из мировой практики в качестве методов проверки транспортно-упаковочных контейнеров применяются различные виды моделирующих испытаний и расчетные методы оценки характеристик упаковок, а также комбинации экспериментальных и расчетных методов при условии, что не вызывает сомне-

ний надежность и консервативность расчетных методов. Как правило, при проведении испытаний проверяется способность ТУК выдержать нормальные и аварийные условия эксплуатации [1]. Проверки способности ТУК выдерживать нормальные условия эксплуатации включают в себя испытания на обрызгивание водой, испытания на удар при свободном падении, испытания на штабелирование и на глубину разрушения. Проверка способности ТУК выдерживать аварийные условия обращения осуществляется в процессе испытаний, представляющих сумму воздействий, моделирующих нормальные условия эксплуатации, и последующих испытаний в предельных аварийных условиях: механическое повреждение при падении на мишень при условии максимально возможного воздействия со стороны мишени; динамическое раздавливание, столкновение; прокол; тепловое испытание в очаге горения; погружение в воду.

Испытания ТУК проводятся на базе аккредитованных испытательных центров. Для организации и проведения испытаний предприятия, осуществляющие испытания, должны располагать аттестованным испытательным оборудованием, проверенными средствами измерения и контроля, а также аттестованными сертифицированными расчетными программами, используемыми для оценки параметров, которые не могут быть получены в результате прямых измерений. Безусловными при проведении испытаний являются выполнение требований безопасности и привлечения к работам по проведению испытаний обученного и соответствующим образом проинструктированного персонала, прошедшего стандартную процедуру допуска. На практике необходимый объем испытаний ТУК для их сертификации проводится на базе различных испытательных центров. Испытательные центры, чаще всего создаваемые на базе производственных предприятий, например, проектирующих и изготавливающих контейнеры, оснащены стендами, способными проводить испытания в рамках необходимого объема в соответствии с требованиями нормативно-технических документов.

ЗАКОНОДАТЕЛЬНАЯ БАЗА В ОБЛАСТИ ТРАНСПОРТИРОВКИ РАДИОАКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН

РК активно использует и развивает атомную промышленность, науку и технологии. Так, в Казахстане имеется развитая урановая промышленность, представляющая собой практически полный цикл производства ядерного топлива – от добычи урана до производства топливных таблеток, а в 2020 году планируется запуск производства тепловыделяющих сборок для реакторов атомных электростанций [2]. В стране эксплуатируются несколько исследовательских реакторов, на которых проводятся фундаментальные научные исследования, прикладные исследования свойств материалов для перспективных ядерных реакторов, получают радиоизотопы для медицины и многое другое [3]. Транспортировка радио-

активных материалов как по территории страны, так и за ее пределы, является неотъемлемой частью осуществления деятельности в атомной отрасли.

На сегодняшний день в Казахстане разработана и внедрена многоуровневая система законодательных и нормативно-правовых актов, регулирующая отношения, возникающие в области ядерной, радиационной, ядерной физической безопасности, а также устанавливающие требования к транспортировке радиоактивных материалов.

Основополагающим законом, определяющим правовую основу и принципы регулирования общественных отношений в области использования атомной энергии в целях защиты жизни и здоровья людей, их имущества, охраны окружающей среды и направлен на обеспечения нераспространения ядерного оружия, ядерной, радиационной и ядерной физической безопасности при использовании атомной энергии является закон РК «Об использовании атомной энергии» [4]. Согласно закона РК «Об использовании атомной энергии» транспортировка ядерных материалов, радиоактивных веществ и радиоактивных отходов осуществляется в транспортных упаковочных комплектах, конструкция которых утверждается уполномоченным органом с указанием кода и типа упаковки, разрешенных к перевозке ЯМ, РВ и РАО, условий перевозки, номера и даты регистрации, срока их действия. Как и для осуществления отдельных видов деятельности или действий (операций) в сфере использования атомной энергии, транспортировка ЯМ, РВ и РАО осуществляется при наличии лицензии, приведенной в законе РК «О разрешениях и уведомлениях» [5].

Непосредственными НПА, определяющие правила перевозки радиоактивных материалов в РК, являются «Правила транспортировки ядерных материалов» [6] и «Правила транспортировки радиоактивных веществ и радиоактивных отходов» [7]. Правила определяют порядок транспортировки радиоактивных материалов всеми видами транспорта наземными, воздушными и водными путями и действуют на всей территории РК.

Как уже было отмечено выше транспортировка ЯМ, РВ и РАО осуществляется в ТУК. ТУК изготавливаются из материалов, обеспечивающих биологическую защиту от ионизирующих излучений и механическую прочность в зависимости от типа упаковок с находящимся в них радиоактивным содержимым. Утверждению или распространению действия сертификатов-разрешений подлежат:

- 1) сертификат (сертификат–разрешение) на конструкцию упаковок типа А;
- 2) сертификат (сертификат–разрешение) на конструкцию упаковок типа В(У) и типа В(М);
- 3) сертификат (сертификат–разрешение) на конструкцию упаковок типа С;
- 4) сертификат (сертификат–разрешение) на перевозку упаковок типов С, В(У), В(М), А;

5) сертификат (сертификат–разрешение) на перевозку упаковок типов ПУ-2 и ПУ-3;

6) сертификат (сертификат–разрешение) на перевозку в специальных условиях.

Для утверждения конструкции ТУК, а также распространения действия сертификатов-разрешений на них, утвержденных уполномоченными органами других стран, на территории Республики заявитель предоставляет пакет документов, содержащий, в том числе, акт о проведенных испытаниях и их результатах [8]. Объем необходимых испытаний определяется вышеуказанными правилами [6,7] в зависимости от типа упаковки.

ВИДЫ ИСПЫТАНИЙ ТРАНСПОРТНЫХ УПАКОВОЧНЫХ КОМПЛЕКТОВ

В соответствии с законодательством РК [7] для проверки способности упаковки выдерживать условия перевозки проводятся испытания. Для проверки способности упаковки выдерживать нормальные условия перевозки проводятся следующие испытания:

- испытание на обрызгивание водой;
- испытание на удар при свободном падении;
- испытание на штабелирование;
- испытание на глубину разрушения.

Для проверки способности упаковок выдерживать аварийные условия перевозки проводятся следующие испытания:

- испытание на механическое повреждение (испытание на падение);
- тепловое испытание;
- испытание на погружение в воду.

При проведении данного испытания ТУК подвергается обрызгиванию водой имитирующее пребывание под дождем интенсивностью примерно 5 см/ч в течение не менее 1 часа (рисунок а, б).

При проведении испытания на удар при свободном падении ТУК должен упасть на мишень с высоты до 9 метров так, чтобы причинялся максимальный ущерб испытываемым элементам, обеспечивающим

безопасность (рисунок, в).

Если форма ТУК не исключает возможность укладки штабелем, образец подвергается сжатию с усилием (рисунок, г).

При испытании на глубину разрушения, ТУК устанавливается на жесткую горизонтальную плоскую поверхность, не смещающуюся при проведении испытаний. Стержень полусферическим концом сбрасывается вертикально в направлении центра наименее прочной части образца так, чтобы он, если пробьет упаковку достаточно глубоко, задел систему герметизации (рисунок, д).

Испытание на механическое повреждение состоит из трех различных видов сбрасывания:

1) при первом виде сбрасывания ТУК должен упасть на плоскую мишень так, чтобы он получил максимальное повреждение;

2) при втором виде сбрасывания ТУК должен упасть на штырь круглого сечения, жестко закрепленный в вертикальном положении на мишени так, чтобы ТУК получил максимальные повреждения (рисунок, з).

3) при третьем виде сбрасывания ТУК должен подвергнуться испытанию на динамическое разрушение при таком размещении ТУК на мишени, при котором он получит максимальные повреждения при падении на него плиты массой 500 кг с высоты 9 м (рисунок, ж).

При проведении теплового испытания ТУК помещают полностью, за исключением простой поддерживающей конструкции, в очаг горения углеводородного топлива в воздушной среде, который имеет достаточные размеры, и в котором существуют условия для обеспечения среднего коэффициента эмиссии (пламени) не менее 0,9 при средней температуре пламени не менее 800 °С в течение 30 мин, или проводят любое другое испытание, обеспечивающее подведение эквивалентного теплового потока к упаковке (рисунок, к).



а) Стенд по обрызгиванию водой



б) Стенд по обрызгиванию водой

Рисунок. Испытания ТУК

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ СТЕНДОВОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ
ТРАНСПОРТНЫХ УПАКОВОЧНЫХ КОМПЛЕКТОВ



в) Стенд для проведения испытания на свободное падение



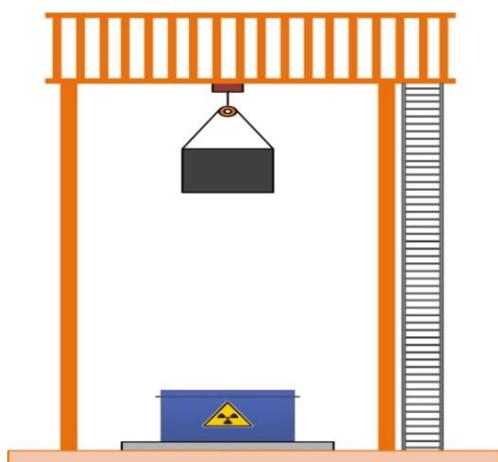
г) Испытание на штабелирование (сжатие с усилием)



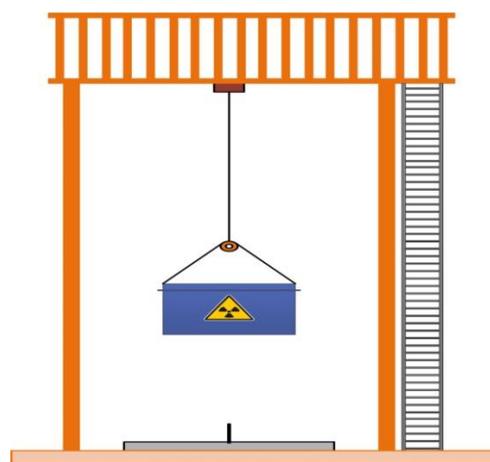
д) Испытание на глубину разрушения



е) Испытание на столкновение

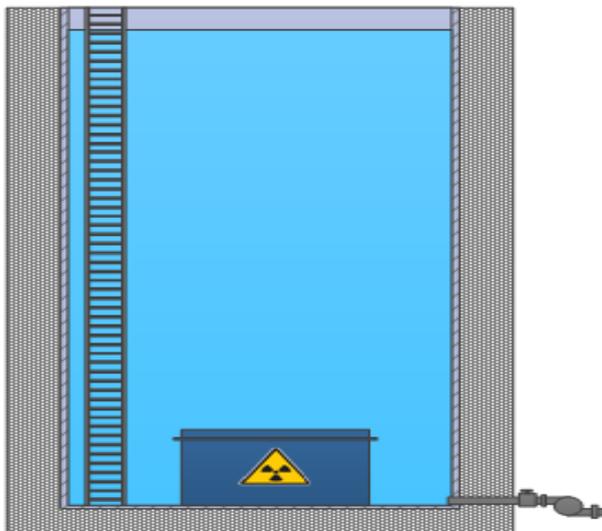


ж) Схематичное изображение испытания на динамическое разрушение

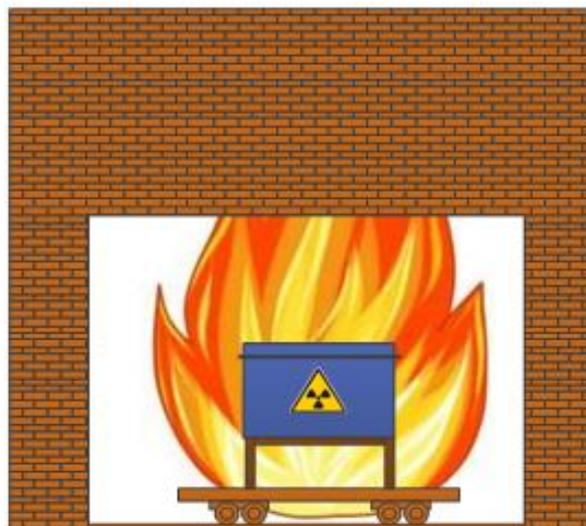


з) Схематичное изображение испытания на прокол (разрыв)

Рисунок. Испытания ТУК (продолжение)



и) Схематическое изображение установки по созданию внешнего избыточного давления



к) Схематическое изображение установки для проведения теплового испытания

Рисунок. Испытания ТУК (продолжение)

При испытании на погружение в воду, ТУК должен находиться под столбом воды высотой не менее 15 м в течение не менее 8 ч в положении, приводящем к максимальным повреждениям (рисунок, и). Принимают, что этим условиям соответствует внешнее избыточное давление не менее 150 кПа.

Данное испытание на столкновение проводится для упаковок типа С. ТУК подвергается столкновению с мишенью при скорости не менее 90 м/с, причем в таком положении, при котором ему будет нанесено максимальное повреждение (рисунок, е).

КОМПЛЕКТАЦИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

На основании вышеизложенного может быть определен предварительный перечень оборудования, специализированного испытательного комплекса, который обеспечит решение задач утверждения конструкций ТУК в Казахстане без обращения в зарубежные компетентные органы.

В виду используемого оборудования и характера проводимых испытаний при проектировании стендового комплекса в составе одного стенда могут проводиться несколько испытаний. Так, в составе одного стенда могут проводиться испытания на свободное падение, на глубину разрушения, штабелирование и испытания на механическое повреждение. При этом стенд должен быть укомплектован следующим оборудованием:

- вышкой (или грузоподъемным механизмом), высота которой обеспечивает поднятие образца на такую высоту, чтобы от нижней его части до поверхности мишени составляло 9 м. Исходя из размеров ТУК, которые на сегодняшний день находятся в эксплуатации габариты вышки должны быть не менее 8×8×17 м (длина, ширина; высота) и грузоподъемностью 50 т. При использовании крана на автомобиль-

ном ходу его грузоподъемность должна быть не менее 100 т, а длина основной стрелы в разложенном состоянии не менее 63 м;

- мишенью в виде вертикальной плоской поверхности, служащая также опорной плитой при испытании на штабелирование. Сопrotивляемость смещению и деформации мишени и ее поверхности должна быть такой, чтобы любое повышение сопротивляемости не приводило к значительному увеличению повреждения ТУК при его падении на мишень. Предпочтительно использовать мишень в виде плиты из углеродистой стали толщиной не менее 12 мм плотно прилегающая всей поверхностью соприкасания к бетонному блоку с габаритами 10×10×1 м, имеющему массу не менее десятикратного значения массы проверяемого ТУК, и закрепленная на нем. Также необходимо предусмотреть в мишени отверстие для закрепления штыря в вертикальном положении для проведения испытания на сбрасывание ТУК с высоты на жестко закрепленный штырь;

- специальным захватом для обеспечения свободного падения ТУК в нужный момент времени. Захват грузоподъемного механизма может быть с механическим или электромагнитным замком с грузоподъемностью 100 т;

- плитой из углеродистой стали толщиной не менее 8 мм и размерами не менее размеров поверхности проверяемого упаковочного комплекта;

- набором грузов для сжатия ТУК: железобетонный груз весом 1 т в количестве 5 штук, железобетонный груз весом 3 т в количестве 2 штук, железобетонный груз весом 5 т в количестве 2 штук;

- стержнем из углеродистой стали диаметром 3,2 см с полусферическим концом и массой 6 кг;

- штырем диаметром 20 см, ударный конец которого образует усеченный прямой круговой конус,

имеющий высоту 30 см и диаметр вершины 2,5 см и массой 250 кг;

- штырем круглого сечения диаметром 15,0 см±0,5 см и высотой 20 см;
- плитой из углеродистой стали размером 1х1 м и массой 500 кг.

Испытания на избыточное давление на внешнюю поверхность и обрызгивания ТУК водой также могут быть объединены в один стенд. Стенд для проведения данных испытаний может представлять собой бассейн, выполненный из бетона и облицованный металлом или металлическую ёмкость подходящего размера. Для подачи воды в бассейн и удержание ее на заданном уровне, бассейн оснащается насосами и запорной арматурой. Для испытания упаковок типа В(У) и типа В(М), содержащих более 10⁵ А₂, и упаковок типа С возможно использовать металлическую емкость с системами герметичности и насосов для создания необходимых условий, либо оснастить данными системами железобетонный бассейн.

Предварительные характеристики железобетонного бассейна (возможно частично заглубленного):

- чаша бассейна облицована нержавеющей сталью;
- габариты чаши для испытания контейнера 8×5×17 метра (длина, ширина, глубина);
- крыша металлическая, съёмная, герметичная;
- система водоснабжения и отведения;
- насос высокого давления, не менее 2 МПа;
- система имитации дождя (форсунки), интенсивность 5 см/ч;
- лестница металлическая наружная, высота 17 м;
- лестница металлическая внутренняя, высота 17 м.

Система по имитации дождя для испытания на обрызгивание водой может быть установлена непосредственно в бассейне. При этом системы подачи и отвода воды, насосы, а также запорная арматура будут общими на два стенда.

На отдельных стендах предусмотрено проведение тепловых испытаний, испытаний на столкновение.

Установка для проведения теплового испытания ТУК может быть выполнена в виде кирпичного здания с воротами. При нештатной ситуации, ворота закрываются, прекращается подача кислорода и прекращается процесс горения. Также установка может быть выполнена в виде бетонной площадки с размерами 10×10×0,3 м (длина, ширина, высота). Также стенд должен быть оборудован передвижной емкостью для подачи ГСМ объемом 7 м³, поддоном для обеспечения равномерного горения и предотвращения разлива горючего и станиной для удержания контейнера на заданной высоте. Для предотвращения распространения огня или при необходимости прекратить испытание, площадка должна быть оборудована средствами пожаротушения.

Для комплектации стенда испытания на столкновение необходима:

- рельсовая ветка, протяженностью, достаточной для разгона образца до требуемой скорости (не менее 90 м/с);
- разгонное устройство на реактивной или электромагнитной тяге;
- железобетонная мишень в вертикальном исполнении.

В целях обеспечения безопасности работ при проведении испытаний на стенды должны быть укомплектованы системами звукового и светового оповещения и металлическими ограждениями по периметру стендов.

Для фиксации проведения испытаний необходимо оснастить стенды высокоскоростными видеокамерами (скорость съемки до 25 700 кадров/с при полном мегапиксельном разрешении 1280×800).

Для обработки результатов испытаний необходимо организовать лабораторию обработки данных, оснастив ее необходимыми приборами и оборудованием: машиной газокислородной и плазменной резки, газорезательной машиной, ультразвуковыми дефектоскопами, рентгеновским томографом и другим оборудованием.

ОРГАНИЗАЦИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ РГП НЯЦ РК

Стендовый комплекс для испытаний ТУК может быть организован на базе вновь созданной специализированной организации, либо на базе предприятия имеющего в наличии необходимую материально-техническую базу для подтверждения эксплуатационных характеристик упаковок на соответствие проектным параметрам, а также аккредитованного для проведения экспертизы ядерной, радиационной и ядерной физической безопасности для проведения расчетов в обоснование ядерной и радиационной безопасности, теплового состояния ТУК. Одним из таких предприятий является Республиканское государственное предприятие «Национальный ядерный центр» Республики Казахстан (РГП НЯЦ РК).

На сегодняшний день РГП НЯЦ РК и его структурные подразделения (филиалы) проводят научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы:

- по созданию инфраструктуры атомной энергетики для обеспечения энергетической безопасности страны;
- по научно-технической поддержке развития атомной отрасли страны, разработке ядерных и радиационных технологий в поддержку ядерной компетенции страны на мировом уровне;
- по обеспечению ядерной и радиационной безопасности, охраны окружающей среды и экологии.

РГП НЯЦ РК имеет необходимые лицензии и разрешения для организации на его базе центра по сертификации ТУК.

Также в РГП НЯЦ РК существует несколько подразделений, которые имеют опыт моделирования нейтронно-физических, тепловых расчетов и могут быть задействованы в компьютерном моделировании и обработке результатов исследований. Специфика и направление проводимых работ в данных подразделениях подтверждает возможность проведения модельных испытаний в обоснование безопасности конструкции ТУК.

Стоит отметить, что в филиале «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК имеется опыт в проведении испытаний ТУК. В 2003 году были проведены испытания контейнера ПУ-1 на подтверждение способности упаковки выдержать нормальные условия перевозки. Проводились следующие виды испытаний: испытание обрызгивание водой, испытание на свободное падение, испытание на укладку штабелем. По окончании всех испытаний было сделано заключение о соответствии контейнера всем техническим требованиям.

Проведенный анализ возможного места расположения стендового комплекса показал, что наиболее подходящим местом является площадка в районе жилой зоны комплекса исследовательских реакторов (КИР) «Байкал-1». Территория КИР «Байкал-1» является действующим объектом и оснащена необходимой инфраструктурой: свободные площади, доступ к инженерным сетям (электричество, водопровод, канализация). Для оснащения стендового комплекса потребуется приобретение необходимого оборудования и материалов, приведенного выше.

Так же для обработки результатов испытаний необходимо организовать на базе существующих материаловедческой лаборатории и лаборатории технической диагностики и контроля НЯЦ РК, лабораторию обработки данных, дооснастив ее новыми приборами и оборудованием: машиной газокислородной и плазменной резки, газорезательной машиной, ультразвуковыми дефектоскопами, рентгеновским томографом

и другим оборудованием. А для компьютерного моделирования испытаний ТУК возможно организовать лабораторию на базе существующих подразделений, дооснастив их необходимым компьютерным оборудованием и программным обеспечением.

Выводы

Подводя итог вышеизложенного, необходимо отметить, что в настоящее время существует потребность в проведении испытаний и сертификации ТУК, используемых на территории РК. Наличие стендового комплекса по испытанию ТУК на территории РК позволит создать условия по замыканию процесса производства ТУК в Казахстане и в перспективе создаст конкуренцию на рынке данных услуг в мире.

Но, в виду того, что вопрос создания стендового комплекса по испытанию и сертификации ТУК изучен только для упаковок, используемых на территории РК и отсутствует информация о используемых упаковках в соседних странах (Кыргызстан, Узбекистан, Таджикистан и т.д.), а также отсутствует информация о перспективах расширения номенклатуры используемых ТУК нельзя однозначно сказать о необходимости и целесообразности в настоящее время строительства полномасштабного стендового комплекса.

Первым шагом по организации процедуры оформления сертификатов-разрешений в РК может быть создание специализированной организации или организации на базе действующего предприятия РГП НЯЦ РК, для пересмотров сертификатов-разрешений, ранее распространенных на территорию РК, связанных с окончанием сроков действия сертификатов-разрешений, или изменением номенклатуры радиоактивного содержимого, которое разрешается перевозить в конкретной упаковке, а также специализирующейся на проведении модельных испытаний ТУК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рекомендации МАГАТЭ, «Правила безопасной перевозки РМ», издание 2009 года.
2. Атомная промышленность в Казахстане // Портал kps.kz URL: https://www.kps.kz/kazakhstan/promyshlennost_proizvodstvo/atomnaya_promyshlennost (дата обращения: 29.12.2019).
3. Национальный ядерный центр Республики Казахстан URL: <https://www.nnc.kz/> (дата обращения: 11.09.2019).
4. Закон РК «Об использовании атомной энергии» № 442-V от 12 января 2016» от 12 января 2016 № 442-V // Премьер-Министра Республики Казахстан. 2016 г. № 7-р. Ст. 8.
5. Закон РК «О разрешениях и уведомлениях» от 16.05.2014.
6. «Правила транспортировки ядерных материалов», от 22 февраля 2016 № 76 // Министр энергетики Республики Казахстан. 2016 г
7. «Правила транспортировки радиоактивных веществ и радиоактивных отходов» №75 от 22 февраля 2016 // Министр энергетики Республики Казахстан. 2016 г. (с изменениями на 22.02.2016 г.).
8. «Правила утверждения конструкций транспортных упаковочных комплектов» № 51 от 9 февраля 2016 года // Министр энергетики Республики Казахстан. 2016 г. (с изменениями на 10.12.2019 г.).

**КӨЛІКТІК БУЫП-ТҮЮ ЖИЫНТЫҚТАРЫН СЫНАУҒА АРНАЛҒАН
СТЕНДТІК КЕШЕНДІ ҚҰРУ ТҰЖЫРЫМДАМАСЫ**

Д.И. Давыденко, А.Г. Коровиков, В.А. Поспелов

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

Қазақстан Республикасында радиоактивтік қалдықтармен (РАҚ), пайдаланылған ядролық отынмен (ПЯО) және ядролық материалдармен (ЯМ) айналысуға байланысты жұмыстарды орындау үдерісінде көліктік-буып-түю жиынтықтарын (КБЖ) сынауды жүзеге асырушы ұйымның жоқ болуы салдарынан Қазақстандық кәсіпорындар әртүрлі тағайындаудағы КБЖ-ны пайдалануға арналған рұқсаттарды алуда қиындықтарға ұшырайды. Бүгінгі күні бұл міндет төменде келтірілген тәсілдердің бірімен шешімін табады:

– КБЖ конструкциясына арналған рұқсат-сертификаттары шетелде рәсімделеді және сертификатты берген елдің аумағында оны алғаннан кейін, сертификат-рұқсаттардың ҚР аумағында қолданылуы таратылады;

– КБЖ-ны нормативтік-құқықтық актілердің (НҚА) қоятын талаптарынан босату. Бұл шешім үнемі қолданылмайды, өйткені тасымалданатын материалдың мөлшерін шектейді (мысалы, бір КБЖ-дағы бөлінетін материалдың массасы 400 граммнан артық емес, егер КБЖ-дағы әрбір жеке орамда бөлінетін ЯМ-ның 15 граммы болатын жағдайда) және тасымалданатын материалдардың барлығына қолданылмайды.

Егер жеке меншік КБЖ-ны сынау базасы болса, Қазақстан КБЖ-ны сертификаттау бойынша шетелдік көмектің қажеттілігінен босатылады. Стендтік кешен (зертхана) Қазақстанда КБЖ өндірісінің үдерісін тұйықтау бойынша жағдай жасауға мүмкіндік береді және әлемдегі осы қызмет нарығында бәсекелестік тудырады.

Түйін сөздер: көліктік-буып-түю жиынтығы, сертификат-рұқсат, стендтік кешен, ядролық материалдар, радиоактивтік заттар, сынақ, жабдық.

**CONCEPTION FOR CREATION OF A BENCH COMPLEX
TO TEST TRANSPORT PACKAGING SETS**

D.I. Davydenko, A.G. Korovikov, V.A. Pospelov

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

Due to the absence in the Republic of Kazakhstan (RK) of an organization that tests transport packaging sets (TUK) in the course of work relating to management of radioactive waste (RW), spent nuclear fuel (SNF) and nuclear materials (NM), RK enterprises have troubles in obtaining permits for the use of TUK for various purposes. Currently, this issue is achieved in one of the following ways:

– certificates-permissions for TUK designs are issued abroad and after they are received on the territory of the country that issued the certificate, the validity of certificates-permissions is expanded over the territory of the Republic of Kazakhstan;

– exemption of TUK from the requirements of regulatory legal acts (RLA). This solution is not always applicable, since it limits the amount of transported material (e.g., the mass of fissile material in one TUK is not more than 400 grams, provided that each individual package in the TUK contains maximum 15 grams of fissile NM) and is not applicable to all transported materials

The availability of the own test base for TUK will set free the Republic of Kazakhstan from the need for foreign assistance in TUK certification. The bench complex (laboratory) will provide conditions for closing the TUK production process in the Kazakhstan and will create competition in the world market for these services.

Keywords: transport-packing set, certificate-permission, bench complex, nuclear materials, radioactive substances, tests, equipment.

УДК 621.039

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННОГО РАЗОГРЕВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА С КОНВЕРТЕРОМ НЕЙТРОНОВ НА ИХ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ

^{1,2)} Сулейменов Н.А., ¹⁾ Мухамедов Н.Е., ¹⁾ Котов В.М.

¹⁾ Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

²⁾ Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

В работе рассмотрено экспериментальное устройство с конвертером нейтронов [1], обеспечивающее изменение спектра нейтронов реактора ИГР из теплового в быстрый. Успешное проведение испытаний требует проведения ряда теплофизических расчетов, достаточно точно моделирующих тепловое состояние экспериментального устройства и позволяющих обосновать безопасные условия проведения эксперимента. В работе приведены результаты нестационарных расчетов теплового состояния экспериментального устройства с конвертером нейтронов с энерговыделением как в топливе, так и в конструкционных материалах, имитирующих энергию деления ядер в твэлах и воздействие мгновенного и запаздывающего гамма-излучения на конструкционные материалы.

Ключевые слова: радиационный разогрев, экспериментальное устройство, энерговыделение в конструкционных материалах, теплофизические расчеты.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений Филиала «Институт атомной энергии» НЯЦ РК является подготовка и проведение внутриреакторных испытаний экспериментальных устройств на КИР ИГР. Каждый эксперимент требует тщательной подготовки, корректной обработки экспериментальных данных и комплекса теплофизических и нейтронно-физических расчетов.

На этапе подготовительных работ одной из важных особенностей, в значительной мере влияющей на точность реализации параметров эксперимента, является определение энерговыделения в различных элементах испытываемого экспериментального устройства. В настоящее время используется в основном часть энерговыделения в ТВС, связанная с делением ядер. Возможность задания постоянных значений удельного энерговыделения в конструкционных материалах, формирующегося за счет радиационного разогрева, обеспечивает полноту картины распределения температурного поля во всем экспериментальном устройстве и его защитном барьере.

Целью работы является сравнительная оценка теплового состояния модели экспериментального устройства с конвертером нейтронов (ЭУ с КН) по результатам теплофизических расчетов с учетом радиационного разогрева конструкционных материалов.

1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО С КОНВЕРТЕРОМ НЕЙТРОНОВ

Общий вид ЭУ с КН показан на рисунке 1. Основными элементами конструкции ЭУ с КН являются силовой корпус и внутренние элементы.

Силовой корпус состоит из следующих элементов (рисунок 1):

- ампула;
- крышка.

В состав внутренних элементов входят:

- секция испытательная;
- ловушка.

Ловушка играет роль защитного барьера от теплового и механического воздействия на корпус ампулы и состоит из обечайки и стакана.

Основными объектами испытаний являются твэлы, расположенные в испытательной секции. В устройстве имеется два твэла – верхний и нижний. Центр верхнего твэла находится на уровне «+800 мм» от ЦАЗ, центр нижнего твэла совпадает с ЦАЗ реактора. Параметры твэлов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры твэлов

Параметр	Значение
Топливо	UO ₂
Обогащение топлива по ²³⁵ U, %	
– в верхнем твэле	~ 17
– в нижнем твэле	~ 0,27
Плотность топлива, г/см ³	10,3–10,8
Диаметр, мм	
– топливной таблетки наружный	5,9±0,02
– центрального отверстия (для верхнего твэла)	1,5±0,1
Высота топливного столба в твэлах, мм	300
Количество топлива, кг	
– в верхнем твэле	0,08
– в нижнем твэле	0,086
Количество активационных детекторов, шт.	
– в верхнем твэле	3,0

Оба твэла набираются из топливных таблеток типа БН-350, высота топливного столба в обоих твэлах одинакова и равна 300 мм. Топливные таблетки расположены в оболочке, представляющей собой трубку из стали X16H15M3B с размерами 6,9×0,4 мм. С торцов твэлы закрыты заглушками. Твэлы охлаждаются азотом, подающимся с температурой ~ 293 К.

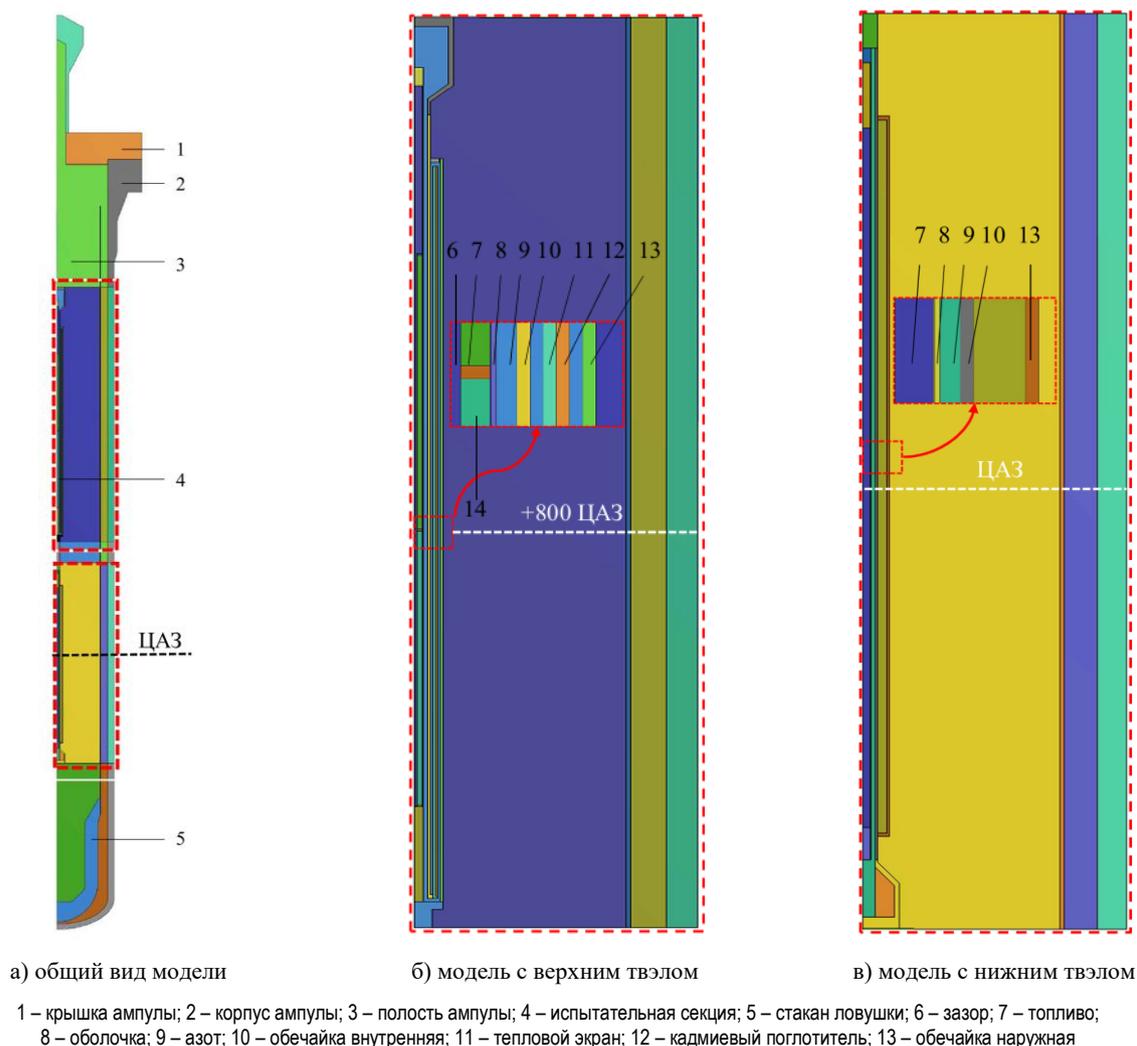


Рисунок 2. Расчетная модель

2 УСЛОВИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ И РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ

Целью теплофизических расчетов ЭУ с КН является определение максимальных значений температуры элементов испытательной секции при различной температуре АЗ, разогревающейся во время работы реактора.

Для проведения теплофизических расчетов в программе *SolidWorks* [2] была разработана двумерная осесимметричная модель экспериментального устройства (рисунок 2-а). Затем модель импортирована в программный комплекс *ANSYS 14.5* [3], в котором был проведен расчет.

В целях оптимизации расчета и снижения вычислительной нагрузки модель предварительно в модуле *ANSYS Design Modeler* была разбита на части, содержащие верхний и нижний ТВЭЛ соответственно (рисунок 2-б и 2-в). Для каждой части был проведен отдельный расчет.

Мощность реактора, согласно условиям эксперимента, составляет 5,2 МВт, а диаграмма ее изменения имеет следующий вид (рисунок 3). В ходе пуска реак-

лизуется регулируемый импульс с суммарным энерговыделением в активной зоне реактора 5,2 ГДж.

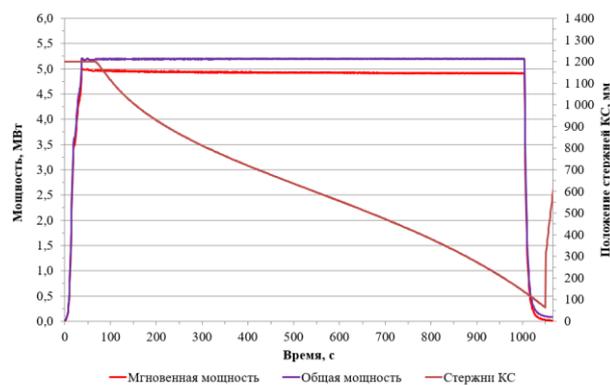


Рисунок 3. Диаграмма изменения мощности реактора

Нейтронно-физические характеристики экспериментального устройства были получены ранее в программе *MCNP* [4] с использованием модели реактора [5] и применены в качестве исходных данных для проведения настоящего расчета. В элементах модели

было задано объемное энерговыделение, моделирующее высвобождение энергии деления ядер и радиационный разогрев конструкционных материалов.

Общие условия теплофизических расчетов следующие:

- учтена неравномерность энерговыделения по высоте АЗ ИГР как в топливе, так и в конструкционных элементах;
- учтено изменение отношения мощности устройства к мощности реактора, связанное с изменением температуры АЗ ИГР;
- начальная температура всех элементов в модели составляет 293 К;
- передача теплоты между элементами осуществляется за счет теплопроводности и конвективного теплообмена;
- расход охлаждающего азота составляет 2 г/с для каждого твэла;
- охлаждение корпуса ампулы отсутствует.

3 ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ УСТРОЙСТВА БЕЗ УЧЕТА РАДИАЦИОННОГО РАЗОГРЕВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для задания неравномерного профиля энерговыделения в топливе была разработана пользовательская функция для программы *ANSYS Fluent*. В соответствии с функцией топливо условно делится на 10 частей, в каждой из которых задается объемное энерговыделение. Функция учитывает изменение энерговыделения во времени в отдельных частях топлива (рисунок 4) в соответствии с повышением температуры активной зоны реактора с ростом энерговыделения [6]. Нумерация частей топлива от 1 до 10 сверху вниз.

По результатам расчета получены максимальные значения элементов в модели экспериментального устройства. Для верхнего твэла данные приведены на рисунке 5, для нижнего – на рисунке 6.

В данном расчете температуры корпуса ампулы и обечайки ловушки не превышают 300 К. Максимальная температура топлива достигает 462÷463 К.

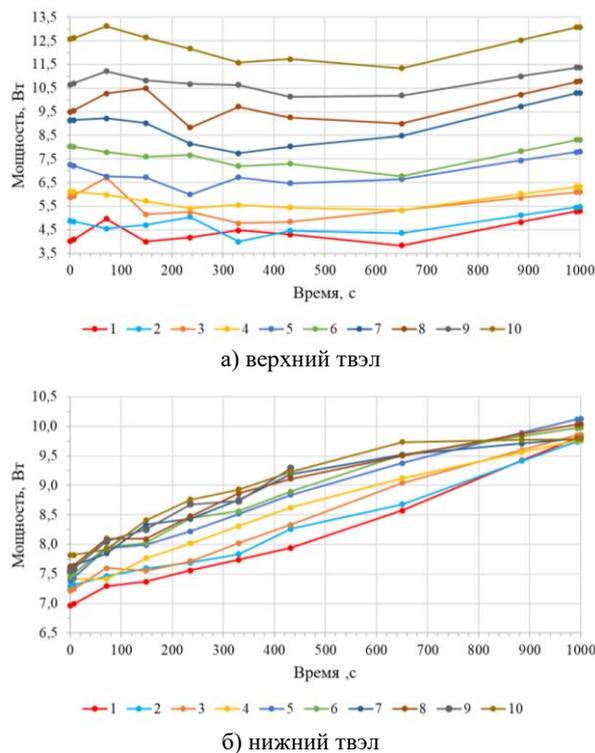


Рисунок 4. Изменение энерговыделения во времени в отдельных частях топлива

4 ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ УСТРОЙСТВА С УЧЕТОМ РАДИАЦИОННОГО РАЗОГРЕВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ЗАЩИТНЫХ БАРЬЕРОВ

Для проведения данного расчета, аналогично, как и для предыдущего, была разработана пользовательская функция, в соответствии с которой объемы элементов модели, где учитывается радиационный разогрев, разделены по высоте на части: для конструкционных элементов – 10 частей, для обечайки ловушки и корпуса ампулы – 27 и 28 частей соответственно. В этих частях функция задает и учитывает изменение энерговыделения во времени.

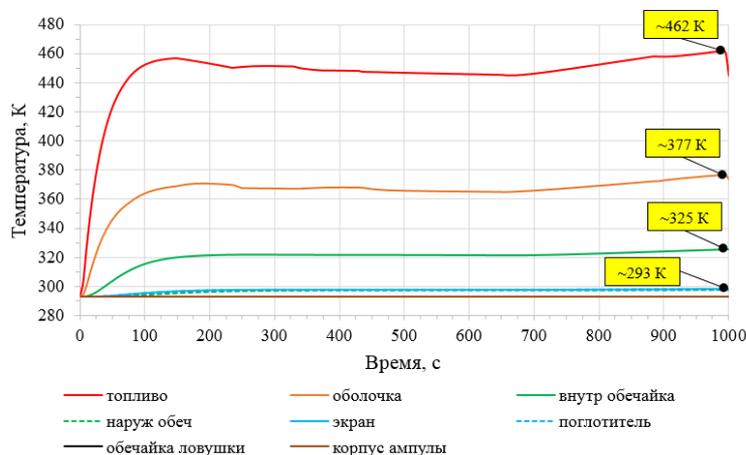


Рисунок 5. Максимальные значения температуры в модели с верхним твэлом

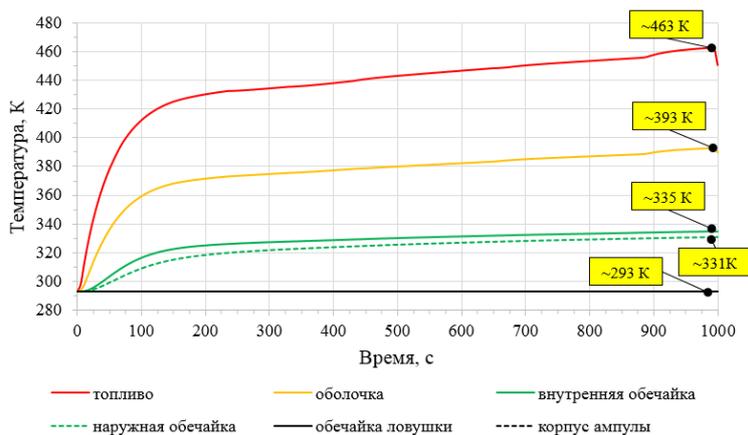


Рисунок 6. Максимальные значения температуры в модели с нижним твэлом

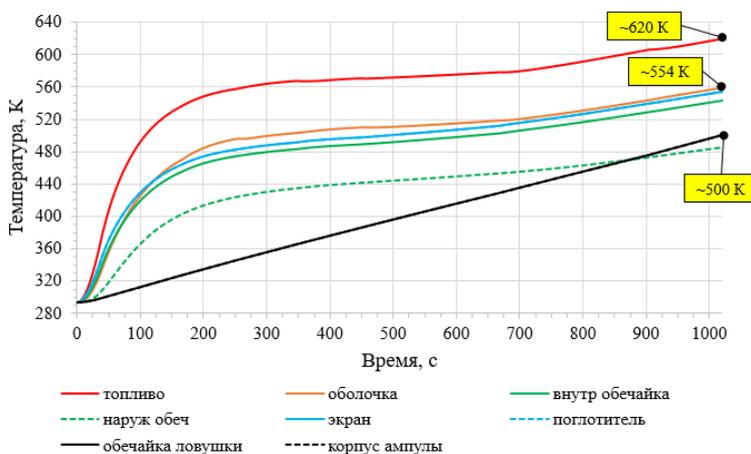


Рисунок 7. Максимальные значения температуры в модели с верхним твэлом

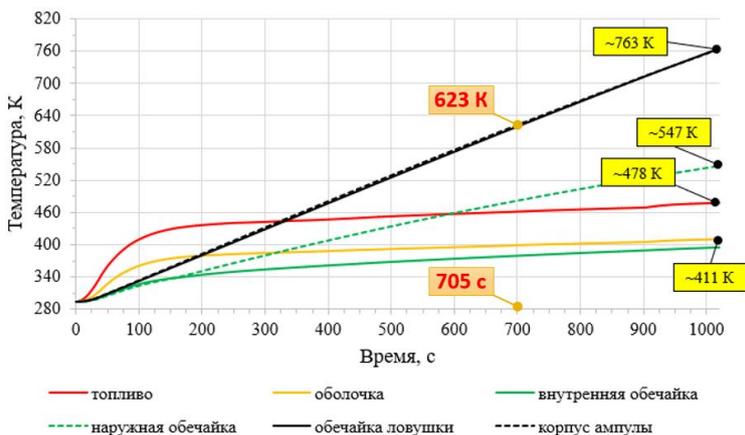


Рисунок 8. Максимальные значения температуры в модели с нижним твэлом

По результатам расчетов получены максимальные значения элементов в модели экспериментального устройства. Для верхнего твэла данные приведены на рисунке 7, для нижнего на рисунке 8.

В проведенном расчете температура корпуса ампулы и обечайки ловушки достигают 763 К на уровне

ЦАЗ, что превышает максимальное расчетное значение температуры корпуса ампулы – 623 К. Этот параметр достигается на 705 с от начала реализации диаграммы изменения мощности. Максимальные значения температуры топлива в верхнем и нижнем твэлах составят 620 К и 478 К соответственно.

5 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ

Рассмотрим высотное распределение температуры элементов твэла (топливо, оболочка, внутренняя и наружная обечайки, конвертер, тепловой экран) и защитных барьеров (обечайка ловушки, корпус ампулы). На рисунке 9-а показано распределение температуры в устройстве без учета радиационного разогрева, на рисунке 9-б – с учетом радиационного разогрева на 990 с диаграммы изменения мощности.

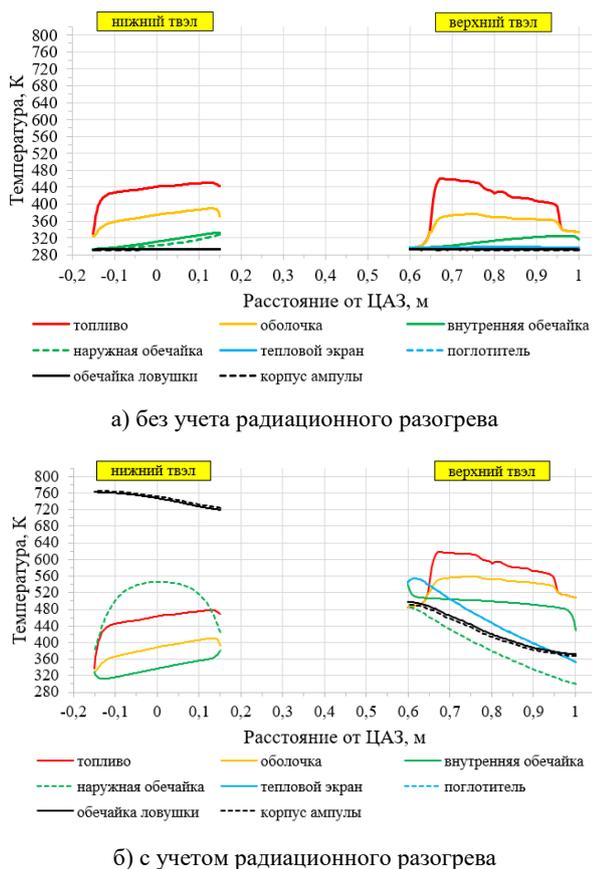


Рисунок 9. Высотное распределение температуры в устройстве

Как видно из рисунка 9-а, если не учитывать радиационный разогрев конструкционных материалов, эффективности системы охлаждения (при расходе

азота 2 г/с на каждый твэл) достаточно для поддержания температуры элементов испытательной секции в довольно низких диапазонах. При учете воздействия гамма-излучения на конструкционные материалы, т.е. при их радиационном разогреве, температурный режим устройства меняется. Температура материалов с большим сечением поглощения нейтронов, в данном случае конвертера нейтронов из кадмия, возрастает.

На рисунке 10 показано высотное распределение удельной мощности элементов экспериментального устройства в логарифмической шкале. Из рисунка видно, что в устройстве мгновенное и запаздывающее гамма-излучение вносит наибольший вклад в поглотитель – в нем выделяется до 3×10^4 кВт/м³. Удельная мощность в топливе находится на уровне $\sim 1,23 \times 10^4$ кВт/м³, а для наружной и внутренней обечайки, теплового экрана, обечайки ловушки и корпуса ампулы сравнима и находится в пределах от $5,9 \times 10^3$ кВт/м³ до $1,4 \times 10^3$ кВт/м³. Для оболочек твэлов эта величина мала (от $2,3 \times 10^3$ кВт/м³ до $1,35 \times 10^2$ кВт/м³).

Максимальные значения температуры элементов на уровнях «+800 мм» и «0 мм» от ЦАЗ, а также среднее значение температуры азота на выходе из тракта охлаждения приведены в таблице 2.

В проведенных расчетах при расходе азота 2 г/с в верхнем твэле максимальная температура поглотителя без учета его радиационного разогрева составляет 298 К, а с учетом радиационного разогрева равна 554 К с запасом до температуры плавления 40 К. Следовательно, данное значение расхода является минимальным для недопущения расплавления конвертера.

Рассмотрим радиальное распределение в модели устройства в расчетах с учетом радиационного разогрева и без его учета (рисунок 11) на высоте «+800 мм» от ЦАЗ и «0 мм», т.е. в середине верхнего и нижнего твэлов.

На высоте «0 мм» от ЦАЗ в обоих расчетах температура топлива меняется незначительно. При учете радиационного разогрева температура корпуса ампулы становится выше температуры топлива из-за отсутствия его охлаждения. В этом случае обечайка ловушки разогревается до 762К, а корпус ампулы до 763 К.

Таблица 2. Значения температуры

Учет радиационного разогрева	Уровень ЦАЗ, мм	T _{макс} , К								T _{ср} , К
		топливо	оболочка	внутренняя обечайка	экран	поглотитель	наружная обечайка	корпус ампулы	обечайка ловушки	
без учета	+800	462	377	325	299	298	297	293	293	332
	0	463	393	335			329	293	293	339
с учетом	+800	620	554	485	554	554	485	492	498	504
	0	478	411	546			546	763	762	360

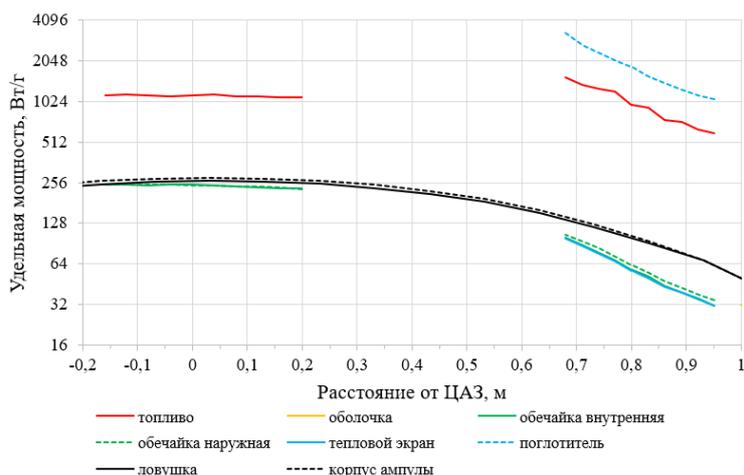


Рисунок 10. Высотное распределение удельной мощности в устройстве

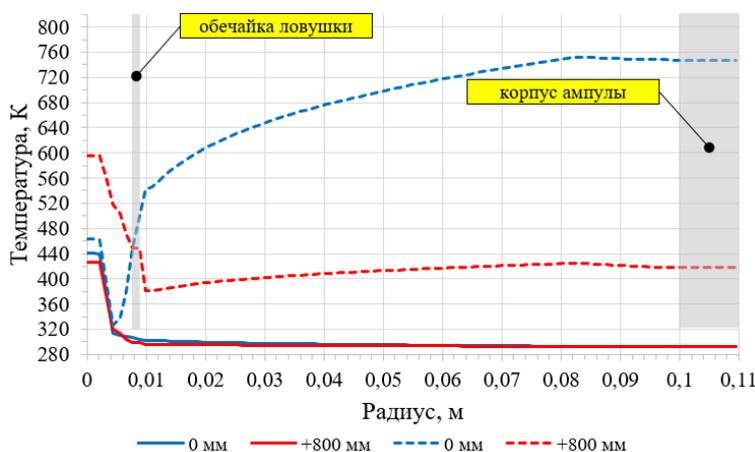


Рисунок 11. Высотное распределение температуры в устройстве с учетом радиационного разогрева

На высоте «+800 мм» от ЦАЗ рост температуры защитных барьеров составляет $\sim (100\div 150)$ К – температура корпуса ампулы возрастает до 492 К, а оболочки ловушки до 498 К. Существенный вклад на изменение температурного режима верхнего твэла вносит конвертер из кадмия, т.к. наибольшее тепло выделяется именно в нем. Конструкция системы охлаждения верхнего твэла устроена таким образом, что азот на входе в первую очередь охлаждает конвертер, а затем твэл, что объясняет повышение температуры топлива в расчете с учетом радиационного разогрева.

Таким образом, для получения более точного распределения температуры в устройстве, и как следствие, повышения представительности теплофизических расчетов, необходимо учитывать радиационный разогрев конструкционных материалов и, кроме этого, прорабатывать диаграмму изменения мощности экспериментального устройства в зависимости от температуры АЗ реактора. Разработка и применение пользовательских функций в программном модуле *ANSYS Fluent* позволяет учитывать неравномерность энерговыделения как по высоте элементов устройства, так и во времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены характеристики работы основных элементов экспериментального устройства с конвертером нейтронов. Разработаны расчетные модели устройства, пользовательские функции, учитывающие временное и высотное распределение энерговыделения в топливе, конструкционных материалах и защитных барьерах устройства.

Проведены теплофизические расчеты экспериментального устройства с учетом и без учета радиационного разогрева конструкционных материалов за счет мгновенного и запаздывающего гамма-излучения. Выяснено, что значение расхода азота 2 г/с на каждый твэл достаточно для охлаждения твэлов при рассмотренной диаграмме испытания устройства, но с учетом радиационного разогрева конструкционных материалов расход следует незначительно увеличить.

По результатам расчетов выполнена сравнительная оценка распределения температуры элементов устройства. С учетом радиационного разогрева конструкционных материалов тепловая нагрузка на элементы устройства возрастает. При реализации диа-

граммы эксперимента с интегральным энерговыделением 5,2 ГДж на 705 с температура корпуса ампулы на уровне «0 мм» от ЦАЗ возможно превысит максимальное расчетное значение 623 К. Полученное значение температуры корпуса ампулы 763 К является максимально возможным, рассчитанное с жесткими консервативными допущениями.

Учет радиационного разогрева конструкционных материалов является важной задачей в подготовке проведения испытаний и обоснования безопасности

конструкции экспериментального устройства. Вышеуказанные замечания будут учтены при разработке программы испытаний ЭУ с КН.

Работа выполнена в рамках Республиканской бюджетной программы «Развитие атомных энергетических проектов» по теме «Исследование поведения твэлов быстрых реакторов в тяжелых авариях».

ЛИТЕРАТУРА

1. Устройство экспериментальное с конвертером нейтронов: техническое задание на разработку технического проекта и рабочей документации / Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК.– Курчатов, 28.02.2019.– Инв. № 11-220-02/938вн.
2. SolidWorks Premium 2014 x64 Edition. SP 5.0 [Электронный ресурс]: 1995–2014 Dassault Systèmes. – Электрон. дан. и прогр. – [Б. м.], 2014.
3. ANSYS release 14.5 Documentation for ANSYS WORKBENCH [Электронный ресурс]: ANSYS Inc.– Электрон. дан. и прогр. – [Б. м.], 2014.
4. MCNP-5.1.40 Monte-Carlo N-Particle Transport Code; Los Alamos National Laboratory; Los Alamos, New Mexico. – April 24, 2003.
5. А. с. ИС 006968 от 27.12.16 Республика Казахстан. Компьютерная модель реактора ИГР для стационарных нейтронно-физических расчетов / А.Д. Вурим, В.М. Котов, Р.А. Иркимбеков, Л.К. Жагипарова, А.А. Байгожина.– № 2738; 27.12.2016.– 1 с.
6. Особенности расчета мощности элементов экспериментального устройства для реакторных испытаний на ИГР / Жанболатов О.М., Иркимбеков Р.А. // Вестник НЯЦ РК. – 2020. – № 2 (82). – С. 55–60.

НЕЙТРОН КОНВЕРТЕРІ БАР ЭКСПЕРИМЕНТТІК ҚҰРЫЛҒЫДАҒЫ ҚҰРАСТЫРЫМДЫҚ МАТЕРИАЛДАР РАДИАЦИЯЛЫҚ ЖЫЛЫТУЫНЫҢ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ РЕЖИМІНЕ ӘСЕРІ

^{1,2)} Н.А. Сулейменов, ¹⁾ Н.Е. Мухамедов, ¹⁾ В.М. Котов

¹⁾ ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

²⁾ Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Мақалада ИГР реакторының нейтрондық спектрінің жылулықтан шапшаңға өзгіртуді қамтамасыз ететін нейтрон конвертері бар эксперименттік құрылғы қарастырылған [1]. Сәтті сынау өткізуі эксперименттік құрылғының жылулық күйін дәл еліктейтін және эксперименттің қауіпсіз жағдайларын негіздеуге мүмкіндік беретін бірқатар жылуфизикалық есептеулерді талап етеді. Мақалада нейтрон конвертері бар эксперименттік құрылғының жылулық күйі бойынша, отын элементтерінде ядролық бөліну энергиясын және құрастырымдық материалдарға лездік және кешікпелі гамма-сәулеленудің әсерін еліктейтін энергия шығарылуы есепке алынған, стационар емес есептер нәтижелері келтірілген.

Түйінді сөздер: радиациялық қыздыру, эксперименттік құрылғы, құрастырымдық материалдардағы энергияның шығарылуы, жылуфизикалық есептеулер.

EFFECT OF RADIATION HEATING OF CONSTRUCTION MATERIALS OF AN EXPERIMENTAL DEVICE WITH A NEUTRON CONVERTER ON THEIR TEMPERATURE REGIME

^{1,2)} N.A. Suleimenov, ¹⁾ N.E. Mukhamedov, ¹⁾ V.M. Kotov

¹⁾ Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

²⁾ D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

The paper considers an experimental device with a neutron converter [1], which provides a change in the neutron spectrum of the IGR reactor from thermal to fast. Successful testing requires a number of thermophysical calculations that sufficiently accurately simulate the thermal state of the experimental device and make it possible to justify the safe conditions of the experiment. The paper presents the results of non-stationary calculations of the thermal state of an experimental device with a neutron converter with energy release both in fuel and in structural materials that simulate nuclear fission energy in fuel elements and the effect of instantaneous and delayed gamma radiation on structural materials.

Keywords: radiation heating, experimental device, energy release in structural materials, thermophysical calculations.

УДК 539.23:539.26:548.73

ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ УРАНА И ЦИРКОНИЯ

^{1,2)} Букина О.С., ^{2,3)} Гречаник А.Д., ^{1,4)} Кожухметов Е.А., ¹⁾ Кукушкин И.М., ^{1,2)} Бакланова Ю.Ю.¹⁾ Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан²⁾ ФГБОУВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Барнаул, Россия³⁾ АО «Ульбинский металлургический завод» АО «НАК «Казатомпром», Усть-Каменогорск, Казахстан⁴⁾ РГП «Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева», Усть-Каменогорск, Казахстан

В филиале ИАЭ РГП НЯЦ РК на экспериментальном стенде «ВЧГ-135» в рамках коммерческих проектов и темы научно-технической программы «Изучение свойств прототипа кориума различных составов» проводятся мало-масштабные эксперименты по получению прототипов кориума различных составов. На базе отдела материаловедческих испытаний исследуются физико-механические свойства, фазовый и элементный состав образцов прототипа кориума, получаемого в процессе высокотемпературных экспериментов на экспериментальных стендах. Цель работы состояла в выявлении твердых растворов на основе диоксидов урана и циркония в фазовом составе кориума, полученного при различных температурах на экспериментальном стенде «ВЧГ-135». Одна из основных задач – разработка способа описания твердых растворов, как компонентов фазового состава.

В статье приводятся методика и результаты определения плотности, исследований структурно-фазовых характеристик образцов кориума с применением методов сканирующей электронной микроскопии (VEGA 3 LMH, TESCAN) и дифрактометрии (Empyrean, PANalytical).

Ключевые слова: кориум, твердый раствор, расплав активной зоны, фазовый анализ, микроструктура, плотность кориума, оценка безопасности.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ безопасности играют важную роль на различных этапах жизненного цикла атомной электростанции (АЭС). Оценка безопасности проводится путем анализа переходных процессов при помощи компьютерных кодов и сравнения результатов с соответствующими приемочными критериями безопасности. Основным инструментом для прогнозирования результатов запроектных и тяжелых аварий являются тяжелоаварийные интегральные коды улучшенной оценки (MELCOR, RELAP/SCDAP, ICARE, SOKRAT) [1]. Выбор названных кодов часто обусловлен возможностью моделирования полного спектра тяжелых аварий на всех этапах их протекания; наличием моделей, описывающих все важнейшие физические процессы; гибкостью их архитектуры и широким набором базовых компонентов, позволяющих моделировать как отдельные узлы, так и целые системы реакторной установки.

В активной зоне реактора при тяжелой аварии возможно протекание физических и химических процессов, которые не ограничиваются только гидродинамикой и теплопереносом. Для расчетных элементов активной зоны применимы модели физических процессов, важнейшие из которых плавление материалов и их перемещение с возможностью полного блокирования проходного сечения, реакции окисления стали и циркония, образование эвтектик, выход продуктов деления из топлива и их распространение в контуре охлаждения и за его пределами, разогрев и проплавление днища корпуса реактора.

Несмотря на кажущуюся проработанность и развитость математического моделирования, для рас-

четного моделирования необходимы входные наборы данных о реакторных установках, взаимодействиях и свойствах материалов, участвующих в физико-химических процессах активной зоны. Кроме того, интегральные коды обязательно должны проходить верификацию основных моделей на экспериментальном материале. Именно на этом этапе приходится понимание того, что все-таки невозможно обойтись без физического моделирования процессов.

Кориумом называется смесь расплава оксидного топлива (диоксид урана) с конструкционными материалами активной зоны (диоксид циркония, цирконий, сталь и пр.) и продуктами их химической реакции с воздухом, водой и паром [2–4].

Основными свойствами кориума, влияющими на безопасную эксплуатацию ядерного реактора, являются: теплофизические свойства расплава; структурно-фазовое состояние; плотность и пористость затвердевшего расплава; остаточное энерговыделение; элементный состав композиции.

В филиале ИАЭ РГП НЯЦ РК проводятся реакторные и вне реакторные экспериментальные исследования с модельными прототипами кориума различных составов. Материаловедческие исследования образцов прототипа кориума, получаемого в процессе высокотемпературных экспериментов на экспериментальных стендах, осуществляются в отделе материаловедческих испытаний.

В рамках данной работы рассмотрены процедуры и результаты экспериментального исследования свойств затвердевшего имитатора расплава активной зоны ВВЭР полученного в маломасштабных экспериментах на стенде «ВЧГ-135».

1 ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты по моделированию запроектных аварий с изменением состояния материалов, входящих в состав твэлов реакторов типа ВВЭР, и анализ литературных источников [2, 3, 4, 5] показали, что при высоких температурах (> 1200 °С) в парогазовой среде сплавы циркония переходят из металлического состояния в оксидное. Взаимодействие металлического циркония с диоксидом урана, в виде порошка или спеченной таблетки, приводит к активному процессу поглощения кислорода цирконием вплоть до образования стехиометрического диоксида циркония. Исходя из этого, для изготовления имитаторов наряду с твэльными трубами в качестве конструктивных материалов применяют, кроме металлического циркония, диоксид циркония, а при исследовании за основу берут систему ZrO_2+UO_2 . При разрушении твэлов необходимо рассматривать взаимодействие систем $Zr+UO_2$ и ZrO_2+UO_2 . Хотя известны диаграммы состояний этих систем, эксперимент свидетельствует, что система тонко реагирует на влияние различных, даже незначительных на первый взгляд, факторов [6]. В системе оксидов урана и циркония отсутствуют химические соединения [6], расплав кристаллизуется с образованием простой эвтектической смеси оксидов и твердых растворов $(U,Zr)O_{2\pm x}$, $(Zr,U)O_{2\pm x}$.

На основе анализа литературы [6, 7, 8] и проведенных исследований [2, 3, 4] было установлено, что тетрагональный ZrO_2 растворяется в UO_2 с образованием твердого раствора при температурах до 1700 °С. С повышением температуры до 1920 °С растворимость ZrO_2 повышается примерно до 40 мол. % [6]. Авторы [6] указывают, что расплав кристаллизуется с образованием простой эвтектической смеси оксидов и твердых растворов $(U,Zr)O_{2\pm x}$, $(Zr,U)O_2$.

Причины кристаллизации твердых растворов в тех или иных составах и конфигурациях составов разнообразны, зависят как от присутствия отдельных компонентов в составе кориума, так и от их взаимного расположения, длительности и температуры и степени завершенности взаимодействия, характера и скорости процесса кристаллизации.

Признаками твердых растворов являются:

1) Зависимость параметров решетки от состава и, как следствие, отклонение их дифракционных линий от положений, соответствующих линиям опорных фаз.

2) Наличие области гомогенности твердых растворов, приводящее в определенных условиях к кристаллизации твердых растворов разного состава в пределах слитка или локального объема затвердевшей композиции кориума. Результатом является формирование сложных уширенных профилей пиков, отвечающих твердым растворам (или их композициям) на дифрактограммах.

Выбор кориумов для исследования обусловлен принципом схожести по составу шихты и максимальной температуре нагрева.

Эксперименты, в результате которых были получены затвердевшие композиции, содержащие твердые растворы, проводились на стенде «ВЧГ-135». Для исследования было взято три вида кориума, отличающихся составом шихты и полученных при разных условиях (см. таблицу 1).

Таблица 1. Информация о маломасштабных экспериментах по получению кориума

Тип композиции	Соотношение компонентов шихты, %				Максимальная температура нагрева, °С
	UO ₂	ZrO ₂	Zr	добавки*	
Композиция 1	53,0	23,5	23,5	—	2100
Композиция 2	48,8	21,7	21,7	7,9	2100
Композиция 3	48,8	21,7	21,7	7,9	2500

Примечание: * – состав добавок: Al₂O₃ + CaO + SiO₂ + Nb₂O₅ + Y₂O₃.

В эксперименте по получению композиции 1 и 2 осуществлялся индукционный нагрев графитового тигля до температуры 2100 °С (ниже температуры ликвидуса) со скоростью 20–40 °С/мин. При достижении температуры 2100 °С температурная полка выдерживалась в течение 60 мин, затем сборка охлаждалась до комнатной температуры за счет теплопотерь со средней скоростью охлаждения 40–50 °С/мин. В эксперименте по получению композиции 3 нагрев до максимальной температуры 2500 °С происходил в четыре этапа. На первом этапе нагрев осуществлялся ступенчато до уровней температуры 1200 °С, 1650 °С и 2000 °С со средней скоростью около 50 °С/мин. По достижению уровня температуры выполнялась стабилизация температуры на этом уровне для сверки показаний температурных датчиков. После этого шихта нагревалась до 2500 °С со средней скоростью 20 °С/мин. На втором, третьем и четвертом этапе были выполнены последовательно охлаждение, нагрев и охлаждение сборки в диапазонах температур 2100–2300 °С (ликвидус) и 1300–1700 °С (солидус) со средними темпами нагрева/охлаждения в этих диапазонах около 20–30 °С/мин. Охлаждение происходило с регулируемой подачей нагрева.

В качестве компонентов исследуемой композиции материалов использовались: UO₂ – раздробленные таблетки обедненной двуокиси урана (примерные размеры частиц от 100 мкм до 800 мкм); ZrO₂ – порошок оксида циркония марки ЦРО-1 (массовая доля суммы двуокисей циркония и гафния, не менее 99,4%); Zr – фрагменты трубки ТВЭЛов из сплава Э110 и стружка из стержней чистого (йодидного) циркония (минимальное содержание циркония 99,75% масс.) в массовом соотношении $m(Zr)/m(Э110) \approx 2,8$. Шихта для состава 3 содержала оксидные добавки – CaO, Al₂O₃, SiO₂, Nb₂O₅, Y₂O₃ – химически чистые порошки с размером частиц менее 50 мкм.

После экспериментов, вольфрамовые тигли с композициями кориума были зафиксированы в обойме эпоксидным компаундом и разрезаны в диаметральном сечении. Изображение поперечного сечения слитков представлено на рисунке 1.

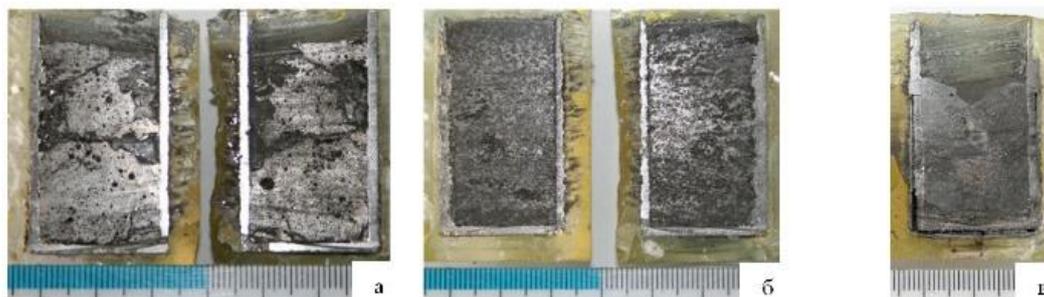


Рисунок 1. Поперечное сечение вольфрамовых тиглей с композициями 1 (а), 2 (б) и 3 (в) после разреза в диаметральном сечении (маломасштабные эксперименты)

2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Методика подготовки образцов для исследований

Фазовый анализ классически выполняется на порошковых образцах материалов. Анализ дифрактограмм от порошковых образцов позволяет выявить линии, соответствующие карточкам баз данных, сделать оценку количественного содержания и пр. Образцы для фазового анализа изготавливались путем измельчения части материала слитков (1/4 слитка) композиций до размера частиц 50 мкм. Полученный порошковый материал запрессовывался в кювету и проводилось рентгенографирование.

Для электронно-микроскопических исследований были подготовлены металлографические шлифы на срезе одной из половин тигля каждой композиции. Подготовка металлографических шлифов проводилась на шлифовально-полировальном станке *Allied TwinPrep 5™* и включала в себя: 1) последовательное шлифование на наждачной бумаге зернистостью: 180, 320, 600, 1000, 1500; 2) последовательная полировка на сукне с применением алмазных суспензий с размерами абразивных частиц: 6, 3, 1 мкм. После каждой стадии шлифовки и полировки образцы промывались в ультразвуковой ванне, для удаления абразивных частиц и связующего алмазной пасты.

Измерения плотности проводились на частях материалов слитков (1/4 слитка), предварительно образцы для измерения плотности были покрыты парафиновой оболочкой.

2.2 Методика получения, обработки и анализа дифрактограмм для фазового анализа

Дифрактограммы были получены на дифрактометре *EMPYREAN* при помощи детектора *PIXcel1D*, работающего в режиме сканирующего линейного детектора (*scanning line detector*). Излучение рентгеновской трубки: $\text{Cu K}\alpha$; напряжение и ток: 45 кВ, 40 мА. Использовалась фиксированная щель дивергенции с угловым расхождением 1° , антирассеивающая щель 2° , размер маски падающего пучка – 20 (обеспечивает ширину падающего пучка 19,9 мм). Время экспозиции (время на шаг) при съемках составляло 91,8 с, размер шага сканирования – 0,026 $^\circ 2\theta$, исследуемый угловой диапазон – 5–153 $^\circ 2\theta$.

Обработка дифрактограмм проводилась посредством программы для обработки и поиска “HighScore”. Процедура обработки дифрактограмм следующие: 1) отделение и удаление линий, соответствующих излучению $\text{K}\alpha_2$; 2) определение фона; 3) поиск пиков; 4) подгонка расчетного профиля по всему диапазону углов дифрактограммы с шагом $\sim 30^\circ 2\theta$, без ограничения диапазона интенсивностей (по максимальной интенсивности выбранного диапазона); 5) анализ и сопоставление пиков дифрактограмм с эталонными карточками доступных баз данных.

Подгонка профиля приводит к формированию уточненных числовых значений параметров пиков, необходимых для определения фазового состава, анализа структурного состояния (т.н. рассчитанных параметров).

Для идентификации фазового состава использовалась база данных *Crystallography Open Database* [9] и база данных *PDF-2* [10].

На начальном этапе анализа и сопоставления пиков эталонным карточкам проводился подбор карточек с ограничением химического состава. Ограничение химического состава вводилось на основании информации о загрузке шихты в тигель. Сложность при идентификации фазового состава состояла в том, что в используемых базах данных отсутствовали подходящие по составу фазы, соответствующие пикам высокой интенсивности, имеющимся на дифрактограммах большинства образцов. Характер расположения этих пиков на дифрактограммах позволял предположить их принадлежность к твердым растворам на основе определенных кристаллических решеток. Следующим этапом анализа и сопоставления был подбор подходящих карточек в базах данных без привязки к элементному составу. Основным критерием при таком подборе было максимальное соответствие угловых положений линий, указанных в карточке базы данных, пикам на дифрактограммы.

Фазы, принятые для идентификации состава разделены (условно) на мажорные и минорные. Мажорные фазы имеют высокие интенсивности, оценку соответствия и количественного содержания. Минорные фазы имеют низкие интенсивности на дифрактограмме, невысокие оценки соответствия.

2.3 Методика электронно-микроскопических исследований

SEM-EDS исследования выполнялись на растровом электронном микроскопе *Tescan Vega 3* с приставкой энергодисперсионного микроанализа *X-act* от *Oxford Instruments*. Изображения были получены при помощи детекторов обратно-отраженных и вторичных электронов. Ускоряющее напряжение для электронов составляло 20 кВ. Расстояние между исследуемой поверхностью и детекторами равнялось 15 мм. Количественный анализ производился с помощью программного обеспечения спектрометра безэталонным методом. Перед помещением в рабочую камеру микроскопа поверхность исследуемого образца напылялась углеродом для создания электропроводного слоя.

На сечениях тиглей из маломасштабных экспериментов для анализа выбирались 3–4 участка исследуемых композиций материалов, расположенные на различной высоте в сечении тигля. С каждого участка получено изображение области во вторичных (SE) и отраженных (BSE) электронах при увеличении $\times 73$ (размер области $3,77 \times 3,77$ мм \times мм), сканирование энергодисперсионного спектра (EDS) области. Затем в пределах этой области выбиралась область с характерной для всего участка микроструктурой, производилась запись BE и SE изображений области при большем увеличении ($\times 1000$), сканирование EDS спектра и картирование распределения спектра в области.

2.4 Методика определения плотности

За основу метода принято определение объема образца по весу (массе) вытесненной им воды (т.е. по закону Архимеда), для чего последовательно взвешивают его в воздухе и в погруженном в воду состоянии. Для предотвращения попадания воды в поры, образец покрывают парафиновой оболочкой (поэтому метод взвешивания в воде также называют методом парафинирования). Проводилась оценка погрешности прямых и косвенных измерений.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Результаты исследований композиции 1

Структура прототипа кориума композиции 1 по результатам SEM-EDS анализа такова, что можно утверждать о расплавлении большей части материалов, помещенных в тигель.

Зерна диоксида урана с угловатыми очертаниями (приближенные к исходной форме частиц), присутствуют только в верхней части образца. Степень оплавления зерен диоксида урана увеличивается от верхней части образца к нижней. Периферийные области данных частиц оплавлены, очертания частиц размыты. Также от верхней части к нижней в структуре образца увеличивается концентрация твердых растворов оксидов урана и циркония.

Плотность композиции в верхней части тигля составила $7,221 \pm 0,017$ г/см³, в нижней части тигля $7,555 \pm 0,015$ г/см³.

Основой фазового состава образцов композиции 1, являются фазы диоксида урана, оксида циркония и твердые растворы типа $(U, Zr, \dots)O_{2\pm x}$. В качестве фаз с малой интенсивностью пиков подобраны соответствия из кандидатных фаз: твердый раствор с отличающимися параметрами решетки и α -уран.

Пик максимальной интенсивности принадлежит фазе оксида циркония Zr_3O гексагональной сингонии (по данным [10, 11] фаза типа ZrO_y подобна фазе на основе (α -Zr)), пространственная группа $R\bar{6}322$ (182) [10]. В описании наиболее подходящей карточки дифрактометрических данных, указаны параметры решетки этой фазы $a = b = 0,563$ нм, $c = 0,520$ нм, расчетная плотность $6,74$ г/см³. Сравнение интенсивностей показывает, что содержание этой фазы растет от верхней области образца слитка, к нижней области (максимальное содержание в нижней области, минимальное – в верхней).

Фазы, соответствующие твердым растворам типа $(U, Zr, \dots)O_{2\pm x}$, имеют следующие характеристики: кубическая сингония, пространственная группа $Fm\bar{3}m$, параметры решетки варьируются в пределах от $0,523$ нм до $0,535$ нм. Приведены предельные значения параметров решетки, так как обособить и выделить один твердый раствор не представляется возможным в связи с уширением линий и размытостью пиков. Кроме того, на дифрактограммах ряда твердых растворов наблюдается последовательное взаимное смещение положения пиков в область малых углов от материала верхней области до нижней области слитка. Максимально смещены пики, относящиеся к дифрактограмме нижней части слитка (на $0,15^\circ 2\theta$). Оценка количественного содержания фаз твердых растворов приводит к значениям 25–35 масс. %.

Фаза диоксида урана UO_2 уверенно идентифицируется в составе, она характеризуется кристаллической решеткой кубической сингонии, пространственная группа $Fm\bar{3}m$, параметр решетки $0,5471$ нм. Количественное содержание фазы в составе на уровне 5–15 масс. %.

Пики малой интенсивности проидентифицированы карточкой α -урана, орторомбическая сингония, пространственная группа $Cmcm$, параметры решетки $a = 0,291$ нм, $b = 0,584$ нм, $c = 0,505$ нм.

3.2 Результаты исследований композиции 2

Структура верхней части образца слитка композиции 2 по результатам SEM-EDS анализа не имеет значительных отличий от средней и нижней частей. Значительных отличий в элементном составе по высоте образца не наблюдается. Как в верхней, так и в нижней частях образца имеются зерна диоксида урана, сохранившие угловатые очертания. Степень оплавления зерен диоксида урана увеличивается от верхней части образца к нижней. В приповерхностной области оплавленных зерен диоксида урана об-

разовались поры. Основными структурными составляющими помимо зерен диоксида урана являются твердые растворы оксидов урана и циркония и металлические фазы на основе циркония.

Кальций, главным образом, равномерно распределен в твердом растворе оксидов урана и циркония. Алюминий и кремний содержатся, в основном, в фазе на основе циркония, но распределение этих элементов в циркониевой фазе не равномерно.

Плотность материала композиции в верхней части тигля составила $6,037 \pm 0,013$ г/см³, $5,702 \pm 0,012$ г/см³ в нижней части тигля $5,641 \pm 0,011$ г/см³, $4,837 \pm 0,010$ г/см³.

Основой фазового состава материала композиции 2 является фаза твердого раствора на основе оксидов урана и циркония (пространственная группа Fm-3m), параметры решетки варьируются от 0,519 нм до 0,532 нм.

Достаточно точно идентифицируются в составе фазы диоксида урана UO₂ и оксида циркония Zr₃O.

Фаза диоксида урана имеет максимальную интенсивность на дифрактограммах, снятых от порошков, соответствующих средним областям слитка, минимальная высотная интенсивность этой фазы в верхней области слитка. Количественная оценка среднего содержания этой фазы около 10-15 масс. %.

Фаза оксида циркония Zr₃O имеет максимальные интенсивности на дифрактограммах, снятых из верхней и нижней частей слитка. Среднее содержание этой фазы около 10 масс. %.

Пики малой интенсивности хорошо описываются карточкой дифрактометрических данных, соответствующей фазе α-урана, орторомбическая сингония, пространственная группа Cmcm, параметры решетки $a = 0,287$ нм, $b = 0,587$ нм, $c = 0,496$ нм.

После обработки дифрактограмм, остались неидентифицированными некоторые пики, относительная интенсивность которых < 30%. Среди кандидатных фаз, имеющих близкое соответствие с линиями дополнительной фазы, имеются интерметаллические соединения вида Si_xZr_y, Al_xZr_y.

3.3 Результаты исследований композиции 3

В образце слитка прототипа кориума композиции 3 структура верхней и нижней части слитка схожа. Основными элементами структуры являются округлой формы включения, состоящие преимущественно из циркония размером до 200 мкм, в составе данных включений присутствуют также уран, алюминий и кремний. Пространство между включениями заполнено твердым раствором оксидов циркония и урана. Кальцийсодержащие включения – включения вытянутой формы с округлыми очертаниями, обладающие пористой структурой.

Центральная часть образца – металлический слиток, элементный состав которого схож с элементным составом округлых включений: основной составляющей является цирконий, также присутствуют уран, алюминий, кремний и вольфрам. Уран и вольфрам в

данном слитке представлены в виде отдельных включений, включения урана имеют вытянутую форму.

Плотность материала композиции в верхней части тигля составила $7,204 \pm 0,015$ г/см³, в нижней части тигля $7,228 \pm 0,015$ г/см³.

Основой фазового состава образцов композиции 3 является набор твердых растворов (Zr,U,...)O_{2±x}, кубической сингонии, пространственная группа Fm-3m. Твердые растворы различаются между собой параметрами решетки. Параметры решетки варьируются от 0,523 нм до 0,530 нм. Пики фаз, отвечающих за твердые растворы, имеют максимальную интенсивность (и, как следствие, максимальное количественное содержание) в образце из верхней части слитка. Интенсивность пиков твердых растворов на дифрактограмме средней части слитка, понижается примерно на 10–15%.

В качестве фаз с меньшим содержанием, идентифицированы в составе:

- оксид циркония (Zr₃O), гексагональной сингонии, пространственная группа P6322 (182). В описании наиболее подходящей карточки дифрактометрических данных, указаны параметры решетки этой фазы $a = b = 0,563$ нм, $c = 0,520$ нм, расчетная плотность $6,74$ г/см³. Количество этой фазы максимально в образце средней части слитка (по результатам сравнения высотных интенсивностей пиков);

- α-уран, орторомбическая сингония, пространственная группа Cmcm (63), пики этой фазы имеют низкую интенсивность. Параметры решетки $a = 0,287$ нм, $b = 0,587$ нм, $c = 0,496$ нм. В верхней части слитка содержание α-урана около 5%, в средней и нижней частях слитка – около 7–8%;

- твердый раствор (Zr,U,...)O₂, решетка кубической сингонии, пространственная группа Fm-3m, параметры решетки 0,538 нм. Пики этой фазы имеют низкие интенсивности, их оценка их количественно содержания на уровне 5%.

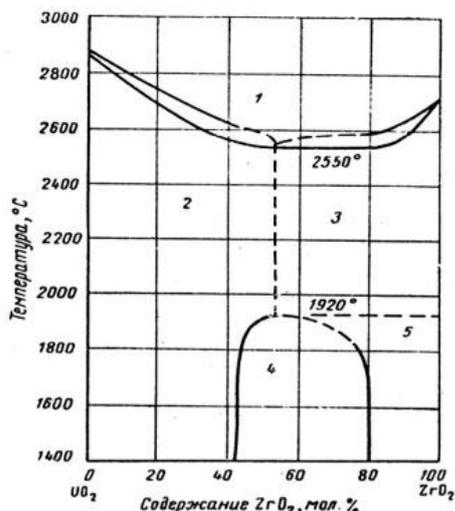
4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для лучшего понимания процессов физико-химического взаимодействия между UO₂-топливом и окислившейся оболочкой твэла (сплав на основе Zr) необходимо знать термодинамические свойства системы U-Zr-O. Поэтому рассмотрение диаграммы состояния системы UO₂-ZrO₂ является составной частью этой проблемы.

Рассмотрим диаграмму состояния системы UO₂-ZrO₂ [8], показанную на рисунке 2. Диоксид урана растворяет от 40 до 53 мол. % оксида циркония при температурах от 1000 до 2550 °С. Около 20 мол. % тетрагонального ZrO₂ растворяется в UO₂ с образованием твердого раствора при температурах до 1700 °С [7, 8, 11]. С повышением температуры до 1920 °С растворимость ZrO₂ повышается примерно до 40 мол. %.

Авторы [6] исследовали процесс сплавления порошка диоксида циркония ZrO₂ с диоксидом урана UO₂ в соотношении как 5:1 при ступенчатом нагреве

при температурах 2200...2300...2350 °С с выдержкой в течение 15 мин на каждом этапе. Они указывают, что при таких условиях происходит полное расплавление материалов и образование структуры мартенситного типа (твердый раствор внедрения) по составу, более близкой к стехиометрическому диоксиду урана (микротвердость 6664...8428 МПа) с выделениями, по составу приближающимися к оксидам циркония нестехиометрического состава, о чем свидетельствуют и значения микротвердости ($H_c=12054 \dots 12446$ МПа).



1 – жидкая фаза; 2 – твердый раствор с кубической решеткой; 3 – твердый раствор неизвестного состава; 4 – твердый раствор с кубической решеткой плюс твердый раствор с тетрагональной решеткой; 5 – твердый раствор с тетрагональной решеткой

Рисунок 2. Диаграмма состояния UO_2 - ZrO_2

Нами были исследованы несколько слитков прототипа кориума, полученные при различных условиях, с различным составом шихты. В маломасштабных экспериментах можно предположить наличие «загрязнений» смесей материалами тигля и вставки. Добавочными компонентами в экспериментах являлись вольфрам – от тигля, и оксидные компоненты – оксид алюминия, кремния, кальция, иттрия, и др.

Однако помимо фаз с примесями при анализе фазового состава удается выделить фазы твердых растворов типа $(U,Zr)O_{2\pm x}$. Благодаря результатам SEM-

EDS анализа удается подтвердить их наличие в составе анализируемых материалов. Ни в одной из областей затвердевших композиций 1, 2, 3 частицы диоксида урана не сохранили исходные форму и размеры. Очертания частиц диоксида урана в разной степени соответствуют исходным формам.

В образцах прототипа кориума, полученных в результате маломасштабных экспериментов наблюдаются различия в зависимости от параметров эксперимента и наличия примесных элементов. Основными фазами в образцах маломасштабных экспериментов композиций 1, 2 и 3 являются: фазы твердых растворов с переменным параметром решетки; фаза диоксида урана UO_2 , характеризуется кристаллической решеткой кубической сингонии; фаза оксида циркония (Zr_3O) гексагональной сингонии; фаза α -урана, орторомбической сингонии.

Рентгенографические характеристики фазы Zr_3O на редкость стабильны, что говорит о устойчивости ее состава и кристаллизации именно в виде устойчивого соединения, что и обуславливает применение выбранной фазы не твердого раствора кислорода в α -модификации металлического циркония, а соединения – оксида циркония Zr_3O .

Ни в одной из областей затвердевших композиций частицы диоксида урана не сохранили исходные форму и размеры. Очертания частиц диоксида урана в разной степени соответствуют исходным формам.

Наиболее плотным оказался материал композиции 1 без добавления оксидных добавок, полученный при нагреве до температуры 2100 °С. Наименее плотным – состав с добавлением оксидных добавок и нагретый до той же температуры (композиция 2).

По результатам обработки дифрактограмм получены широкие диапазоны параметров решетки твердых растворов. На основе данных о положении граничных пиков через квадратичную формулу кубического кристалла определяются параметры решетки твердых растворов [12]. Таким образом, диапазон параметров решетки сужается. Затем производится расчёт концентрации компонентов раствора в линейном приближении и уточняются химические формулы граничных твердых растворов. Результаты перерасчета параметров решетки твердых растворов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты сравнения определяемых практически и расчетных параметров решетки твердых растворов

Тип состава слитка	$T_{max}, ^\circ C$	Фаза (Fm-3m)	Параметр решетки твердого раствора		Химическая формула твердого раствора (расчетная)
			определяемый в результате обработки, Å	расчетный, Å	
Композиция 1	2100	UO_2	5,47	$5,4662 \pm 0,0007$	-
		$(U, Zr, \dots)O_{2\pm x}$	5,23...5,42	$5,262 \pm 0,015$; $5,408 \pm 0,004$	$U_{0,43}Zr_{0,57}O_2$ (4:6); $U_{0,84}Zr_{0,16}O_2$ (8:2)
Композиция 2	2100	UO_2	5,47	$5,4667 \pm 0,0004$	-
		$(U, Zr, \dots)O_{2\pm x}$	5,19...5,32	$5,232 \pm 0,009$; $5,420 \pm 0,006$	$U_{0,34}Zr_{0,66}O_2$ (3:7); $U_{0,87}Zr_{0,13}O_2$ (9:1)
Композиция 3	2500	$(U, Zr, \dots)O_{2\pm x}$	5,23...5,30	$5,2699 \pm 0,0019$; $5,2555 \pm 0,0007$	$U_{0,44}Zr_{0,56}O_2$ (4:6); $U_{0,4}Zr_{0,6}O_2$ (4:6)

Данные, полученные при физическом моделировании запроектных (тяжелых) аварий могут быть использованы при разработке и верификации расчетных кодов, для обоснования безопасности проектируемых АЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований образцов прототипов кориума, полученных при различных условиях, с различным составом шихты позволяют сделать следующие выводы:

1. В составе прототипов кориума идентифицированы соединения, соответствующие твердым растворам $(U, Zr)O_{2+x}$. Твердые растворы в системе ZrO_2-UO_2 представляют собой растворы замещения, в которых атомы урана и циркония замещают друг друга в металлической подрешетке, атомы кислорода в этой системе являются внедрениями в подрешетке. Такое представление структуры твердых растворов согласуется с литературными данными.

2. В образцах прототипа кориума наблюдаются различия в зависимости от параметров эксперимента и наличия примесных элементов. Параметры решетки твердого раствора в композиции 1 варьируются в пределах от 0,523 нм до 0,535 нм, в композиции 2 – от 0,519 нм до 0,532 нм, в композиции 3 – от 0,523 нм до 0,530 нм, а также обнаруживается твердый раствор с параметром решетки 0,538 нм.

3. В прототипе кориума композиции 1 концентрация твердых растворов максимальна в нижней

части образца. В композиции 2 основными структурными составляющими помимо зерен диоксида урана являются твердые растворы оксидов урана и циркония и металлические фазы на основе циркония. В твердом растворе оксидов урана и циркония присутствует примесный элемент – кальций. В композиции 3 прототипа кориума основными элементами структуры являются включения округлой формы, состоящие преимущественно из циркония размером до 200 мкм, в составе данных включений присутствуют также уран, алюминий и кремний. Пространство между включениями заполнено твердым раствором оксидов циркония и урана.

4. Плотности материалов слитков отличаются по высоте. В прототипах кориума композиций 1 и 3 нижние части имеют большую плотность (на 0,3–4%). В прототипе кориума композиции 2 наоборот – верхняя часть слитка имеет большую плотность (на 10–20%). В общем, максимальная плотность наблюдается в нижней части прототипа кориума композиции 1.

В фазовом составе кориума выявлено присутствие твердых растворов на основе диоксидов урана и циркония; предпринята попытка описания твердых растворов как компонентов фазового состава и сравнения их характеристик. Эти данные могут быть использованы при разработке и верификации расчетных кодов, для обоснования безопасности проектируемых АЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Е. Киселев, Н. А. Мосунова, В. Н. Носатов, А. Е. Стрижов, Д. Ю. Томащик Применение интегральных кодов для моделирования аварийных режимов реакторов типа ВВЭР // Труды ИБРАЭ РАН / под общ. ред. чл.-кор. РАН Л.А. Большова; Инт-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. – Вып. 12: Разработка и применение интегральных кодов для анализа безопасности. – М.: Наука, 2011. – с. 204–218.
2. Жданов, В.С. Взаимодействие расплава активной зоны с материалами реакторной установки в проблеме тяжелой аварии ВВЭР: дис. канд. тех. наук: 05.14.03: / Жданов Владимир Семенович. – Курчатов, 2007. – 109 с.
3. Бешта С.В. Высокотемпературные процессы с расплавами кориума в проблеме безопасности АЭС с ВВЭР / Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Санкт-Петербург, 2004 г.– 462 с.
4. Бакланов, В.В. Взаимодействие кориума с корпусом водо-водяного энергетического реактора при тяжелой аварии: дис. канд. тех. наук: 01.04.07: / Бакланов Виктор Владимирович. – Томск, 2017. – 154 с.
5. А.Н. Киселев, К.П. Чечеров. Модель процесса разрушения реактора 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС // Атомная энергия. 2001, т. 91, в. 6, с. 425–434.
6. Металлографический анализ продуктов взаимодействия оболочек тепловыделяющих элементов с топливными материалами в условиях тяжелых аварий / В.С. Красноруцкий, А.П. Данилов, В.К. Яковлев, В.М. Евсеев, Р.А. Матющенко, Е.А. Слабоспицкая, Я.А. Куштым // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2009. – № 4–2 (94). – с. 178–184.
7. Г.Я. Сергеев, В.В. Титова, К.А. Борисов. Металловедение урана и некоторых реакторных материалов. М.: Атомиздат, 1960, 223 с.
8. Р.П. Эллиот. Структура двойных сплавов. М.: Металлургия, 1970, т. 2, 472 с.
9. Gražulis, S.; Chateigner, D.; Downs, R. T.; Yokochi, A. F. T.; Quirós, M.; Lutterotti, L.; Manakova, E.; Butkus, J.; Moeck, P. & Le Bail, A.; Crystallography Open Database - an open-access collection of crystal structures, J. Appl. Cryst., 2009, 42, 726–729.
10. PDF-2 ICDD Release 2004.
11. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: в 3 т.: Т.3 Кн.1 / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 2001. – 872 с.
12. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. Уманский Я.С., Скаков Ю.А., Иванов А.Н., Расторгуев Л.Н. М.: Металлургия, 1982. 632 с.

УРАН ЖӘНЕ ЦИРКОНИЙ НЕГІЗІНДЕ ҚАТТЫ ЕРІТІНДІЛЕРДІ ЗЕРТТЕУ

^{1,2)} О.С. Букина, ^{2,3)} А.Д. Гречаник, ^{1,4)} Е.А. Кожакметов, ¹⁾ И.М. Кукушкин, ^{1,2)} Ю.Ю. Бакланова

¹⁾ ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

²⁾ «И.И. Ползунов атындағы Алтай мемлекеттік техникалық университеті» ФМБЖБМ, Барнаул, Ресей

³⁾ «Қазатомөнеркәсіп» Ұлттық атом компаниясы» АҚ «Үлбі металлургия зауыты» АҚ, Өскемен, Қазақстан

⁴⁾ «Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті» РМК, Өскемен, Қазақстан

ҚР ҰЯО РМК АЭИ филиалында «ВЧГ-135» эксперименттік стендінде коммерциялық жобалардың «Әртүрлі құрамдары бар корийум прототипінің қасиеттерін оқып зерттеу» ғылыми-техникалық бағдарлама тақырыбының аясында әртүрлі құрамдары бар корийум прототипін алу бойынша кіші масштабты эксперименттер жүргізіледі. Материалтану сынақтары бөлімінің базасында физика-механикалық қасиеттері, эксперименттік стендтерде жоғары температуралық эксперименттер процессінде алынатын корийум прототипі үлгілерінің фазалық және элементтік құрамы зерттелінеді.

Жұмыстың мақсаты «ВЧГ-135» эксперименттік стендте әртүрлі температураларда алынған корийумның фазалық құрамында цирконий мен диоксид уран негізінде қатты ерітінділерді анықтаудан тұрады. Негізгі міндеттердің бірі – фазалық құрамның компоненттері ретінде қатты ерітінділерді сипаттау тәсілін әзірлеу.

Мақалада сканерлейтін электрондық микроскопия (*VEGA 3 LMH, TESCAN*) мен дифрактометрия (*Empyreon, PANalytical*) әдістерін қолданумен корийум үлгілерінің құрылымдылық-фазалық сипаттамаларды зерттеу, тығыздығын анықтау нәтижелері мен әдістемесі келтіріледі.

Түйінді сөздер: корийум, қатты ерітінді, активті балқыма, фазалық талдау, микроқұрылым, корийумның тығыздығы, қауіпсіздікті бағалау.

INVESTIGATION OF URANIUM AND ZIRCONIUM BASED SOLID SOLUTIONS

^{1,2)} O.S. Bukina, ^{2,3)} A.D. Grechanik, ^{1,4)} E.A. Kozhakhmetov, ¹⁾ I.M. Kukushkin, ^{1,2)} Yu.Yu. Baklanova

¹⁾ Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

²⁾ FSBEIHE “Altai State Technical University named after I.I. Polzunov”, Barnaul, Russia

³⁾ “Ulba Metallurgical Plant” JSC of “NAC “Kazatomprom”, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

⁴⁾ RSE “D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University”, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

In the IAE Branch RSE NNC RK at the VCG-135 test-bench within the framework of the commercial projects and scientific and technical program entitled “Study of the corium prototype properties of various compositions” small-scale experiments are carried out to obtain corium prototypes of various compositions. Physical and mechanical properties, phase and elemental composition of corium prototype samples resulted from high-temperature experiments on test-benches are being investigated based on the Material Testing Department.

The work was aimed at identifying solid solutions based on uranium and zirconium dioxides in the phase composition of corium, obtained at different temperatures at the VCG-135 test-bench. One of the main issues is to develop a method for describing solid solutions as components of phase composition.

The article provides a method and results of determining the density, studies of the structural and phase properties of corium samples using scanning electron microscopy (*VEGA 3 LMH, TESCAN*) and diffractometry (*Empyreon, PANalytical*).

Keywords: corium, solid solution, core melt, phase analysis, microstructure, corium density, safety assessment.

УДК 621.039.6; 533.9.08; 621.039.66

КАРБИДИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА В ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОМ РАЗРЯДЕ**Жанболатова Г.К., Бакланов В.В., Туленбергенов Т.Р., Миниязов А.Ж., Соколов И.А.***Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан**E-mail: kaiyrdy@nnc.kz*

В данной работе рассматривается метод карбидизации поверхности вольфрама с применением пучково-плазменного разряда, который был осуществлен на плазменно-пучковой установке для выявления особенностей данного подхода карбидизации. Отличительной особенностью реализованного метода является то, что он наиболее близок к процессам, которые могут вызвать карбидизацию поверхности при эксплуатации термоядерных установок. Данный метод позволяет изменять параметры эксперимента для получения конкретного покрытия с заданными характеристиками. В результате проведенных экспериментальных работ установлено, что при температуре 1500 °С при времени экспозиции 600 с образуется полукарбид W_2C , а при увеличении времени до 3600 с образуется монокарбид WC вольфрама.

Ключевые слова: метан, карбид вольфрама, покрытие, плазменное напыление, плазма, пучково-плазменный разряд.

ВВЕДЕНИЕ

Высокая температура плавления, высокий порог распыления и низкое накопление трития создают предпосылки для использования вольфрама в качестве материала, обращенного к плазме, и структурных компонентов термоядерных реакторов [1, 2]. Однако интенсивное воздействие тепловых потоков на материал могут привести к значительному накоплению поверхностных повреждений. В связи с этим, улучшение физических, тепловых и механических характеристик поверхности вольфрама является одной из главных задач в области термоядерной энергетики.

Образование соединений вольфрама и углерода, а также взаимодействие их с плазмой изначально изучалось, поскольку предполагалось использовать графит и вольфрам в качестве кандидатных материалов для дивертора термоядерного реактора [3–5]. Образование тонкого поверхностного слоя карбида вольфрама (WC) можно рассматривать как альтернативный способ улучшения его эксплуатационных характеристик при контакте с плазмой, в частности его эрозивной стойкости. Карбид вольфрама (WC) обладает более низкой теплопроводностью, чем вольфрам, при этом имеет аналогичные характеристики теплового расширения, с достаточной электропроводностью и высокой температурой плавления [6].

В настоящее время существует много различных методов получения покрытий на рабочих поверхностях конструкционных материалов. Их можно разделить на три основные группы с учетом специфики протекания процессов формирования покрытий [7–8]. К первой группе относятся химико-термические методы, при которых формирование покрытий осуществляется преимущественно за счет диффузионных реакций между насыщающими элементами и структурами инструментального материала. Во вторую группу входят методы химического осаждения покрытий из газовой фазы, в которых формирование покрытий происходит за счёт реакций между парогазовыми смеша-

ми, состоящими из соединения металлоносителя, носителя второго компонента, служащего, как газом-транспортёром, так и восстановителем. К третьей группе можно отнести методы физического осаждения покрытий из газовой фазы, где формирование покрытий идет за счет испарения тугоплавкого металла-образователя соединения покрытий, его частичной или полной ионизации, распыления, подачи реакционного газа, химических и плазмохимических реакций, конденсации покрытия на рабочих поверхностях металлов [9–12].

Методы плазменного напыления покрытий считаются одними из эффективных методов, так как осаждение можно проводить с помощью низкотемпературной плазмы. Данные методы позволяют использовать различные материалы: металлы, сплавы, окислы, карбиды, нитриды, бориды, пластмассы и их различные комбинации; наносить их в несколько слоев, получая покрытия со специальными характеристиками; улучшить качество покрытий. К основным недостаткам метода можно отнести малую эффективность и неэкономичность процесса напыления. В плазменных методах используют микроволновую плазму, высокочастотную плазму и газоразрядную плазму.

В данной работе рассматривается метод карбидизации поверхности вольфрама с применением пучково-плазменного разряда, который был осуществлен на плазменно-пучковой установке (ППУ) для выявления особенностей данного подхода карбидизации.

1 ПОВЕРХНОСТНАЯ КАРБИДИЗАЦИЯ ВОЛЬФРАМА НА ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОЙ УСТАНОВКЕ**1.1 Понятие о ППР**

Генерация газоразрядной плазмы осуществляется с использованием тлеющего, дугового, искрового и др. разрядов. К этому ряду также можно добавить пучково-плазменный разряд (ППР). По сравнению с другими типами разрядов основные характеристики ППР (плотность плазмы, ее состав и электронный

энергетический спектр) можно варьировать в широком диапазоне, изменяя режим работы электронной пушки, а также распределение магнитного поля, состав и плотность рабочего газа.

Пучково-плазменным разрядом принято называть явление, связанное с образованием плазмы при прохождении через газ достаточно мощного электронного пучка, причем концентрация и площадь поперечного сечения образующейся плазмы могут значительно (на несколько порядков) превышать концентрацию электронов и площадь поперечного сечения первичного пучка. Характерным для пучково-плазменного разряда является передача значительной энергии электронов пучка плазме, что реализуется при бесстолкновительном режиме распространения электронов и связано с коллективными взаимодействиями в системе плазма-пучок. В представляемой работе ППР используется для поверхностной карбидизации вольфрама.

2.1 Описание установки

Эксперименты по получению карбидизированного слоя на поверхности W проводились на ППУ [13, 14]. Данная установка предназначена для тестирования методик измерения параметров ППР при исследовании взаимодействия плазмы КТМ с материалами, для проведения испытаний диагностического оборудования и материалов КТМ, а также для развития существующих и разработки новых методов моделирования нагрузок на конструкционные материалы, изучения свойств и поведения материалов после взаимодействия с плазмой.

Основными узлами ППУ являются: электронная пушка, газоразрядная камера ППР, электромагнитная система для создания продольного магнитного поля, вакуумная камера взаимодействия ППР с материалом и диагностическая система плазмы. Общая схема установки приведена на рисунке 1.

Принцип работы установки состоит в следующем. Электронная пушка формирует аксиально-симметричный электронный пучок. Катод пушки подогревается электронной бомбардировкой с нити подогревателя.

Мощность пушки регулируется мощностью подогрева катода и подачей ускоряющего напряжения на катод. Автономная откачка ППУ с системой диафрагм обеспечивает вакуумный перепад между камерой электронной пушки и камерой взаимодействия. Электронный пучок взаимодействует с рабочим газом в разрядной камере, образуя ППР. Электромагнитная система создает продольное магнитное поле на оси установки до 0,1 Тл и позволяет управлять геометрией ППР. В итоге, в камере взаимодействия ППР происходит взаимодействие низкотемпературной плазмы с материалом, размещенного на мишенном устройстве.

2.2 Физические и химические процессы, происходящие при поверхностной карбидизации вольфрама при плазменном воздействии

Взаимодействие плазмы с поверхностью материалов является важным направлением исследований в области развития управляемого термоядерного синтеза, а также лежит в основе многочисленных технологических процессов, связанных с модификацией поверхности материалов для улучшения прочностных, антикоррозионных свойств и т.д. Так как поверхность, обращенная к плазме, подвергается воздействию ионов, электронов, нейтральных атомов, молекул и их фрагментов в различных состояниях возбуждения, а также электромагнитного излучения.

При воздействии ионов с поверхностью возможны следующие виды процессов: обратное рассеяние иона атомом или группой атомов; атомная и внутренняя дислокация; физическое распыление, т.е. удаление с поверхности атомов при передаче большого импульса иона; отражение ионов от поверхности в виде нейтральных частиц в результате оже-нейтрализации; вторичная ион-электронная эмиссия; адсорбция; образование на поверхности новых химических соединений, что имеет отражение в данной работе. Некоторые элементарные процессы при взаимодействии плазмы с поверхностью твердого тела показаны на рисунке 2.

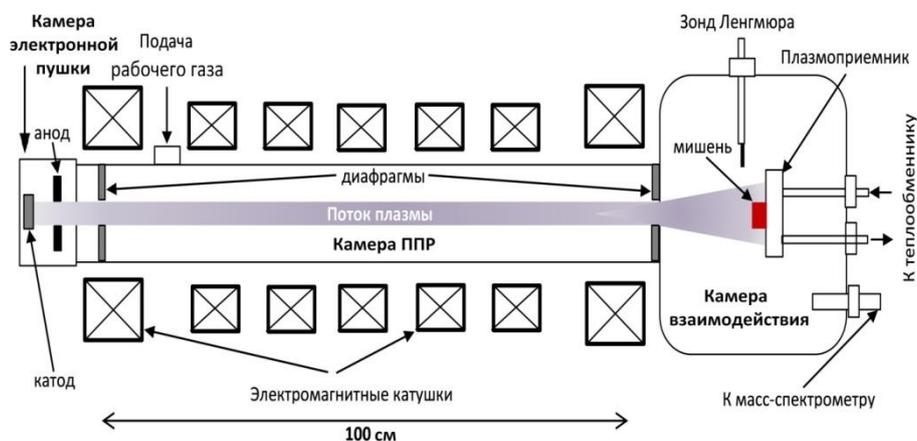
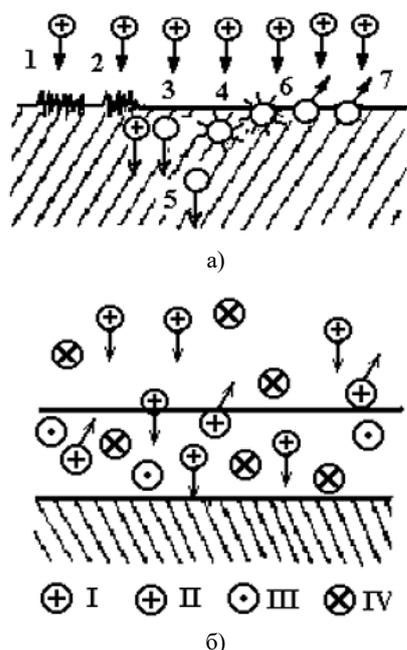


Рисунок 1. Принципиальная схема ППУ



1 – химические реакции; 2 – изменение топографии поверхности; 3 – сорбция атомов и ионов; 4 – дефектообразование; 5 – имплантация; 6 – десорбция; 7 – распыление. I – первичные ионы; II – вторичные ионы; III – вторичные электроны; IV – распыляемые частицы

Рисунок 2. Элементарные процессы при взаимодействии плазмы с поверхностью твердого тела: на поверхности и в приповерхностной зоне (а), у поверхности (б) [15–17]

Вероятность каждого из процессов зависит от свойств ионов, попадающих на поверхность: масса, величина заряда, скорость движения ионов и угол столкновения с поверхностью. Немаловажную роль в таких процессах играет состав, температура, физико-энергетические свойства и топография поверхностного слоя материала.

На рисунке 3 показана диаграмма, показывающая возможность осуществления различных технологических процессов в зависимости от основных параметров процесса – энергии E_i и плотности тока n ускоренных ионов [17, 18].

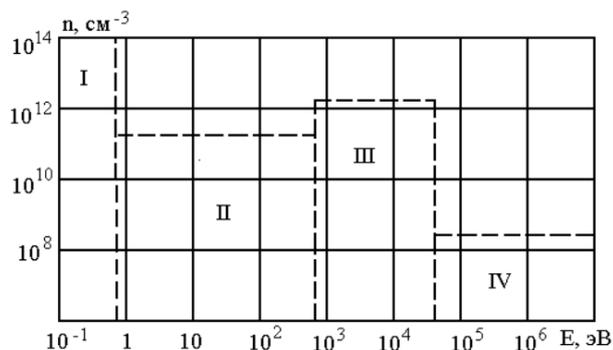


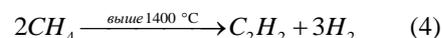
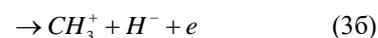
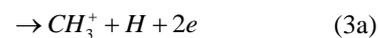
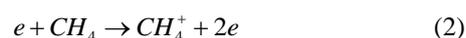
Рисунок 3. Диаграмма основных параметров плазмы – энергия E_i и плотность тока ускоренных ионов n , определяющие вид технологического процесса [17, 18]

Область I диаграммы ($E_i < 1$ эВ) соответствует процессам с тепловой природой (традиционные методы химии и металлургии, включая низкотемпературные плазменные процессы). Для вакуумно-плазменной технологии нанесения покрытий эта область соответствует вакуумному испарению и конденсации. Основным эффектом для области II диаграммы ($E_i \sim 10^0-10^3$ эВ) является конденсация из ускоренного ионного потока. Эти процессы соответствуют ионному осаждению (иногда называемые конденсацией с ионной бомбардировкой). При энергиях, входящих в III область диаграммы ($E_i \sim 10^3-10^4$ эВ), возрастает распыление поверхности, и начинают проявляться эффекты внедрения ионов вглубь кристаллической решетки. Эта область энергии соответствует процессам ионного травления, катодного распыления, ионной очистки. Область IV диаграммы ($E_i \sim 5 \cdot 10^4-5 \cdot 10^7$ эВ) соответствует процессам ионного внедрения или имплантации ионов.

Для проведения поверхностной карбидизации вольфрама на ППУ используется плазмообразующий газ в виде метана (CH_4). В основе процесса получения карбида вольфрама лежит прямая реакция:



Процесс карбидизации на ППУ идет с участием углеводородов, образующихся при запуске метана в разрядную зону в результате ионизации электронным пучком. Особенности строения молекулы метана при взаимодействии с электронами приводят к довольно большому разнообразию возможных реакций: реакция (2) описывает процесс однократной ионизации, в результате которой образуется молекулярный ион, реакция (3а)-(3б) соответствуют процессам диссоциативной ионизации с образованием фрагментных ионов и нейтральных осколков, а реакция (4) соответствуют разложению метана [18].



Во время проведения экспериментов по карбидизации вольфрама данные реакции протекают в камере взаимодействия, о чем свидетельствует диаграмма остаточных газов, приведенная на рисунке 4. На диаграмме видно, что в камере взаимодействия преобладают молекулы водорода, радикалы метана и ацетилена.

Для проведения поверхностной карбидизации вольфрама был реализован режим, соответствующий области II диаграммы на рисунке 3. Энергия ионов CH_4 составляла 500 эВ и выдерживалась длительность облучения 600 и 3600 секунд исходя из ранее полученных результатов [19]. Условия проведения эксперимента показаны в таблице.

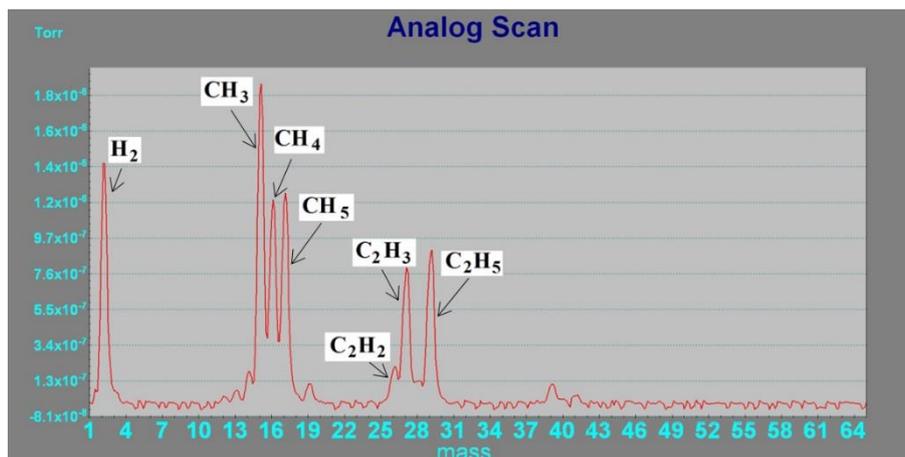


Рисунок 4. Состав остаточных газов в камере взаимодействия во время эксперимента

Таблица. Основные параметры и результаты экспериментов на установке ППУ

Давление рабочего газа, Торр		1·10 ⁻³
Энергия ионов, эВ		500
Температура поверхности образца, °С		1500±10
Длительность облучения, с:	НР-1	600
	НР-3	
	НР-2	3600
	НР-4	
Состав поверхности образцов вольфрама	НР-1	W – 2 %, WC – 7 %, W ₂ C – 91 %
	НР-3	WC – 1 %, W ₂ C – 99 %
	НР-2	WC – 94 %, W ₂ C – 6 %
	НР-4	WC – 99 %, W ₂ C – 1 %

Рентгено-фазовый анализ показал, что основной фазового состава после облучения длительностью 600 секунд является W₂C с процентным содержанием более 90 масс. %, при облучении с длительностью 3600 секунд основной фазой является WC с процентным содержанием более 90 масс. %.

Образование монокарбида WC происходит на поверхности вольфрама, из которого внутрь частицы диффундирует углерод и образует нижележащий слой полукарбида вольфрама W₂C.

Сложность детального исследования элементарных процессов на поверхности тел и в их объемах, происходящих в результате воздействия плазмы, заключается в том, что из-за различной энергии и плотности частиц, в частности, ионов т.к. они имеют большую массу, различные процессы бывают взаимосвязанными. Вследствие этого, изучение физических процессов карбидизации на ППУ является од-

ной из важных задач для отработки методик нанесения вакуумных покрытий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были проведены исследования по карбидизации вольфрама с применением метода, основанного на использование ППР. Преимущества такого метода, реализованного на ППУ заключается в создании условий для химических реакций и физических процессов, максимально приближенных к возможным в термоядерных установках.

В результате проведенных экспериментальных работ установлена закономерность, что карбиды W₂C и WC образуются при температуре около 1500 °С. Также было выявлено, что с увеличением флюенса ионов в зависимости от времени облучения при длительности эксперимента 600 секунд преобладает полукарбид W₂C, а при продолжительности воздействия метановой плазмы на вольфрам в течение 3600 секунд преобладает карбид WC.

Масс-анализ во время проведения экспериментов по карбидизации вольфрама показал, что переносчиком углерода к поверхности вольфрама являются радикалы метана и ацетилена

Результаты исследования процесса поверхностной карбидизации вольфрама в ППР могут применяться для разработки технологии нанесения покрытий.

Данная работа выполнена в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан № AP08955992 «Исследование формирования карбидизированного слоя на поверхности вольфрама при плазменном облучении».

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Pintsuk., A. Hasegawa. Tungsten as a plasma-facing material // Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. – 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11696-0>
2. Escourbiac F. et al. Effort on Design of a Full Tungsten Divertor for ITER // 24th, IAEA Fusion Energy Conference, San Diego, 2012.
3. H. Bolt, V. Barabash, G. Federici, J. Linke, A. Loarte, J. Roth, K. Sato. Plasma facing and high heat flux materials-needs for ITER and beyond // J. Nucl. Mater. – 2002. – V.307. – P. 43–52.

4. Youchison, D., Gehrig, M., Lumsdaine, A., Klett, J., Greuner, H., & Böswirth, B. High heat-flux response of high-conductivity graphitic foam monoblocks // *Fusion Engineering and Design*. – 2019. – V. 146. – P. 417–420. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.12.081>
5. Humphry-Baker, S. A., Smith, G. D. W., & Pintsuk, G. Thermal shock of tungsten carbide in plasma-facing conditions // *Journal of Nuclear Materials*. – 2019. – V. 524. – P. 239–246. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.06.041>
6. R.C. Gassmann, *Mater. Sci. Tech.* – 1996. – V. 12. – P. 691–69.
7. Самсонов Г.В., Эпик А.П. Тугоплавкие покрытия. Изд. 2-е, пер. и доп. М.: Металлургия, 1973, с. 400.
8. Самсонов Г.В., Латышева В.П. ФММ, 1956, т. 2, с. 309.
9. Минкевич А.Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. Изд.: Машиностроение, 1965.
10. Осаждение из газовой фазы. Под ред. Л. Пауэлла и др. (пер. с англ.). Атом-издат., 1970.
11. Киреев В., Столяров А. Технологии микроэлектроники. Химическое осаждение из газовой фазы. – М.: Техносфера, 2006. – 192 с. – ISBN 5-94836-039-3.
12. Moers K.Z. *Chem.*, 1931. Bd 198, S. 233.
13. Патент РК на полезную модель № 2080. Имитационный стенд с плазменно-пучковой установкой / Колодешников А.А., Зуев В.А., Гановичев Д.А., Туленберген Т.Р. и др. – опублик. 15.03.2017, Бюл. № 5.
14. V. Kurnaev, I. Vizgalov, K. Gutorov, T. Tulenbergenov, I. Sokolov, A. Kolodeshnikov, V. Ignashev, V. Zuev, I. Bogomolova, N. Klimov. Investigation of plasma–surface interaction at plasma beam facilities. – *Journal of Nuclear Materials*, 2015, vol. 463, p. 228–232. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.076>
15. Власов В.В. Элементарные процессы в плазме газового разряда. – Х.: ХНУ, 2008. – 175 с.
16. Мак-Даниель И. Процессы столкновений в ионизованных газах. – М.: Мир, 1967. – 832 с.
17. Гусева М. И., Мартыненко Ю. В. Взаимодействие частиц плазмы с поверхностью // *Итоги науки и техники. Сер. Физика плазмы*. Т. 2. – М.: ВИНТИ, 1990. – С. 150–190.
18. Б. А. Павлов, А. П. Терентьев. Курс органической химии. – Издание шестое, стереотипное. – М.: Химия, 1967. – С. 58.
19. Соколов И.А., Скаков М.К., Миниязов А.Ж., Туленберген Т.Р. Изучение процессов образования карбидов на поверхности дивертора термоядерного реактора. – *Вестник КазНАЕН*. – 2019. – Вып. 1.– С. 44–49.

ШОҚТЫҚ-ПЛАЗМАЛЫҚ РАЗРЯДТЫ ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ ВОЛЬФРАМНЫҢ БЕТІН КАРБИДИЗАЦИЯЛАУ

Ғ.Қ. Жанболатова, В.В. Бакланов, Т.Р. Туленберген, А.Ж. Миниязов, И.А. Соколов

ҚР ҰАӨ РМК «Атом энергия институты» филиалы, Курчатова, Қазақстан

Бұл жұмыста плазмалық-шоқтық қондырғыда карбидизациялау тәсілінің ерекшеліктерін анықтау үшін жүргізілген шоқтық-плазмалық разрядты қолдана отырып вольфрамның бетін карбидизациялау әдісін қарастырамыз. Іске асырылған әдістің айрықша ерекшелігі термоядролық қондырғыларды пайдалану кезінде беткі карбидизацияны тудыруы мүмкін процестерге жақындығы болып табылады. Бұл әдіс эксперименттің параметрлерін көрсетілген сипаттамалары бар нақты жабынды алу үшін өзгертуге мүмкіндік береді. Эксперименттік жұмыстарының нәтижесінде 1500 °С температурада ұсталу уақыты 600 с болғанда вольфрам жарғылай карбиді W_2C , ал 3600 с уақытта вольфрам монокарбиді WC түзілетіндігі анықталды.

Түйінді сөздер: метан, вольфрам карбиді, жабын, плазмалы тозандату, плазма, шоқтық-плазмалық разряды.

CARBIDIZATION OF THE TUNGSTEN SURFACE IN A BEAM-PLASMA DISCHARGE

G.K. Zhanbolatova, V.V. Baklanov, T.R. Tulenbergenov, A.Zh. Miniyazov, I.A. Sokolov

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

This paper considers the method of carbidization of tungsten surface with the use of beam-plasma discharge, which was carried out in plasma-beam installation to identify the characteristics of the carbide approach. A distinctive feature of the implemented method is that it is closest to the processes that can cause surface carbidization during the operation of thermonuclear installations. This method allows you to change the parameters of the experiment to obtain a specific coating with specified characteristics. As a result of experimental work, it was found that tungsten semi-carbide W_2C is formed at a retention time of 600 s at 1500 °C, and tungsten monocarbide WC at 3600 s.

Keywords: methane, tungsten carbide, coating, plasma spraying, plasma, beam-plasma discharge.

УДК 621.039.5

РАСЧЕТ ДИАГРАММЫ МОЩНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА С КОНВЕРТОРОМ НЕЙТРОНОВ

Жанболатов О.М., Иркимбеков Р.А., Мухамедов Н.Е.

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

В статье приведена методика расчета мощности элементов экспериментального устройства, основной целью которого является конвертация потока тепловых нейтронов ИГР. Данная методика является усовершенствованием различных расчетных способов получения данных по энерговыделению в конструктивных элементах испытываемых устройств на стадии планирования экспериментальных исследований.

Ключевые слова: ИГР, точечная кинетика, мощность реактора.

ВВЕДЕНИЕ

Реактор ИГР [1] является исследовательским реактором с уникальными нейтронно-физическими характеристиками. Одним из направлений научных изысканий является моделирование различных аварийных ситуаций, способных произойти на реакторах и оценка возникающих повреждений. Для решения подобных вопросов необходимо проведение высокоточных экспериментальных исследований.

Одним из главных критериев эффективности эксперимента является знание динамики распределения энерговыделения в активной зоне самого реактора, в топливе и конструкционных материалах экспериментального устройства. Данная характеристика важна для определения допустимых границ, при которых обеспечивается безопасность хода эксперимента. Проблема с распределением мощности становится особенно актуальной в случае отсутствия или ограничения охлаждения различных испытываемых элементов.

Данная работа ставит целью получение достоверных расчетных данных по энерговыделению в топливе и конструкционных материалах в эксперименте с конвертором нейтронов ИГР [2–5]. Расчеты необхо-

димы для моделирования температурных полей в элементах, во избежание перегрева и расплавления, что может привести к нежелательным последствиям.

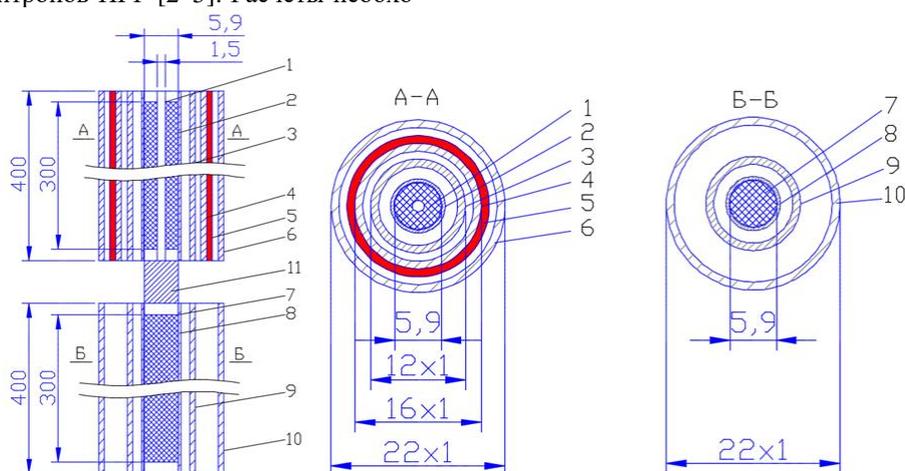
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО

На рисунке 1 представлен эскиз испытательной секции экспериментального устройства.

Испытательная секция представляет собой сварную конструкцию и предназначена для размещения в ней двух твэлов, конвертора нейтронов и измерительного оборудования в процессе подготовки и проведения эксперимента.

В состав испытательной секции входят следующие элементы:

- верхний твэл с конвертором, с топливом массой ~ 80 г в виде диоксида урана и с обогащением по ^{235}U равным 17 %;
- верхний твэл без конвертора, с топливом массой ~ 86 г в виде диоксида урана и с обогащением по ^{235}U равным 0,27 %;
- соединительная штанга, соединяющая два твэла и задающая требуемое расстояние между ними;
- опорная штанга, обеспечивающая крепление твэлов к крышке ампулы.



1 – топливо 17%; 2 – оболочка верхнего твэла; 3 – рубашка охлаждения «верхнего» твэла; 4 – тепловой экран; 5 – кадмиевый поглотитель; 6 – корпус нижнего твэла; 7 – топливо 0,27%; 8 – оболочка нижнего твэла; 9 – рубашка охлаждения нижнего твэла; 10 – корпус нижнего твэла, 11 – талреп

Рисунок 1. Эскиз конструкции испытательной секции

Верхний твэл с конвертором содержит следующие элементы:

- оболочка, выполненная в виде трубки 6,9×0,4 мм с приварными нижними заглушками и крышками;

- внутренняя обечайка в виде трубки 12×1 мм, высотой 320 мм, образующая полость охлаждения твэла;

- тепловой экран, выполненный в виде трубки из стали марки 12Х18Н10Т, размером 16×1 мм, высотой 400 мм;

- кадмиевый поглотитель, выполненный в виде пластины, скрученной в трубку размером 18×1×400 мм, и закрепленный за тепловым экраном на уровне твэла;

- наружная обечайка в виде трубки 22×1 мм, высотой 400 мм, образующая полость охлаждения кадмиевого поглотителя;

Нижний твэл без конвертора содержит те же элементы, что и верхний твэл, за исключением теплового экрана и кадмиевого поглотителя.

Поглотитель нейтронов конвертора выполнен из природного кадмия. Низкая температура плавления кадмия потребовала введения тракта его охлаждения. Тракты теплоносителя тепловыделяющих сборок – отдельные, с идентичной геометрией по газовому потоку.

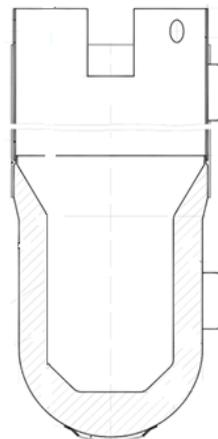
Твэлы обеих сборок набираются из топливных таблеток типа БН-350, высота топливного столба в обоих твэлах одинакова и равна 300 мм. Топливные таблетки из диоксида урана расположены в оболочке, которая представляет собой стальную трубку с размерами 6,9×0,4 мм. С торцов твэлы закрываются заглушками. Центр верхнего твэла находится на высоте +800 мм относительно центра активной зоны, середина нижнего твэла совпадает с центром активной зоны.

При этом у каждого твэла есть свои отличительные конструктивные особенности. Верхний твэл содержит топливные таблетки из диоксида урана массой около 80 г с обогащением 17 % по ^{235}U , конвертер тепловых нейтронов в быстрые (кадмиевая трубка). Нижний твэл не содержит кадмиевого поглотителя и набирается из топливных таблеток из диоксида урана массой около 86 г с обогащением 0,27 % по ^{235}U .

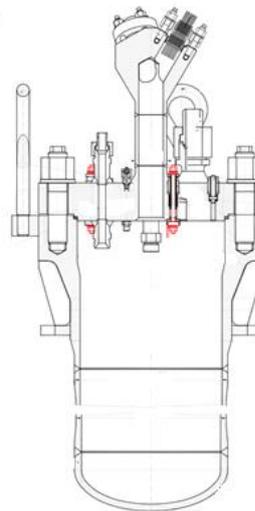
Испытательная секция помещается в защитный корпус с ловушкой расплава (рисунок 2-а). Ловушка представляет собой стальной стакан с наружным диаметром 158 мм и высотой 250 мм. К торцу стакана приварен стальной корпус. Корпус представляет собой обечайку с наружным диаметром 167 мм и толщиной 1,5 мм. Ловушка устанавливается внутрь защитной ампулы и предназначена для защиты стенок внутреннего корпуса ампулы от перегрева во время эксперимента.

Защитная ампула (рисунок 2-б) представляет собой сварную конструкцию из стали, состоящую из

цилиндрической обечайки, фланца и эллиптического днища. Основная задача ампулы – защита стенок ампулы реактора НА228 от высокотемпературного воздействия частей испытательного устройства.



а) схема ловушки расплава



б) схема защитной ампулы

Рисунок 2. Защитные чехлы экспериментального устройства с конвертором нейтронов

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ И ПРОГРАММЫ

Управление реактором при проведении эксперимента основано на знании зависимости мощности в исследуемом устройстве и в реакторе. Для определения энергетических параметров топлива и конструкционных материалов экспериментального устройства с учетом нагрева графитовой кладки реактора ИГР, был выполнен ряд нейтронно-физических расчетов с помощью программы MCNP5 [6] с библиотеками ядерных констант ENDF/B-VII. При проведении расчетов использовалась модель реактора ИГР [7], детально описывающая реальную конструкцию, и учитывающая неравномерность распределения концентрации урана в объеме активной зоны. Моделирование ЭУ осуществлялось с соблюдением основ-

ных размерно-материальных характеристик. Объединенная расчетная нейтронно-физическая модель экспериментального устройства с конвертером нейтронов и ИГР представлена на рисунке 3.

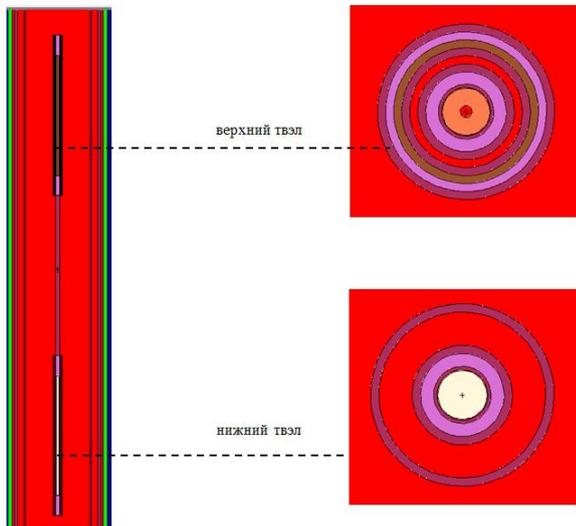


Рисунок 3. Модель испытательной секции экспериментального устройства для нейтронно-физического расчета

РАСЧЕТ ДИАГРАММЫ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА ИГР ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПУСКА

Эксперимент с конвертером нейтронов ИГР имеет свои специализированные задачи. Для получения необходимых результатов исследования было решено выбрать режим работы «импульс» с максимальным интегральным энерговыделением 5,2 ГДж. Проведя предварительные расчеты в «холодном» состоянии кладки ИГР, была принята диаграмма реактора со стационарной мощностью 5,2 МВт (рисунок 4), позволяющая получить оптимальную диаграмму мощности в испытываемых твэлах, учитывая теплофизические характеристики.

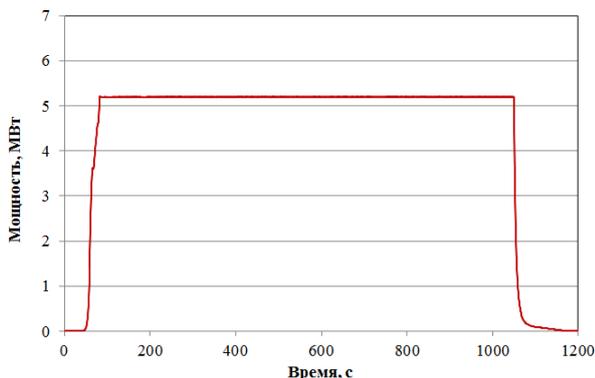


Рисунок 4. Планируемая диаграмма мощности реактора в эксперименте

Для нахождения диаграммы мощности топливных и конструктивных элементов необходимо использовать результаты расчетов нейтронно-физиче-

ских характеристик с помощью модели реактора. Установка экспериментального устройства в ЦЭК ИГР меняет полученные значения отношения мощности элемента к мощности реактора в результате изменения нейтронно-физических параметров реактора. Использование базы данных сечений и специального программного обеспечения для заданного температурного диапазона работы ИГР в эксперименте с целью расчета отношения энерговыделения элемента к энерговыделению реактора, позволяют точнее смоделировать поведение топливных сборок устройства в испытании.

Для сравнения расчетных характеристик применялись методики, характеризующиеся усложнением и учетом большего количества физических явлений, происходящих во время испытания. Более подробно особенности каждой методики описаны в [8]. Наиболее достоверная методика расчета диаграммы мощности элементов экспериментального устройства, учитывает изменение динамических нейтронно-физических параметров реактора ИГР и экспериментального устройства, изменяющихся от времени и температуры кладки активной зоны реактора ИГР. Система дифференциальных уравнений расчета мощности реактора ИГР и элемента экспериментального устройства имеет следующий вид:

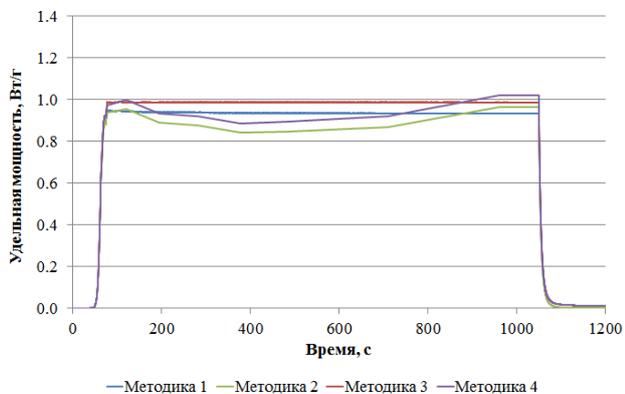
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t)-1}{l} \cdot n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \cdot c_i(t) + s \\ \frac{dc_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{l} \cdot n(t) - \lambda_i \cdot c_i(t) \\ W_{\text{МГН}} = C_u \cdot \sigma_f \cdot E_f \cdot V_{\text{аз}} \cdot \varphi(t) \\ \frac{dC_{\gamma j}(t)}{dt} = YB_{\text{реакт}} \cdot W_{\text{МГН,реакт}} \cdot \beta_{\gamma j} - \lambda_{\gamma j} C_{\gamma j} \\ W_{\text{общ}} = W_{\text{МГН}} + W_{\text{зап}} \\ W_{\text{зап}} = \sum_j \lambda_{\gamma j} C_{\gamma j} \\ W_{\text{к.м.}} = K(T) * W_{\text{общ реактора}} \\ \frac{dC_{\gamma j}(t)}{dt} = YB_{\text{к.м.}}(T) \cdot W_{\text{к.м.}} \cdot \beta_{\gamma j} - \lambda_{\gamma j} C_{\gamma j} \\ W_{\text{зап к.м.}} = \sum_j \lambda_{\gamma j} C_{\gamma j} \\ W_{\text{общ к.м.}} = W_{\text{МГН к.м.}} + W_{\text{зап к.м.}} \end{array} \right. \quad (*)$$

где n – плотность нейтронов реактора; c_i – плотность ядер-предшественников; t – время; $\rho(t)$ – реактивность; l – время жизни нейтронов; λ_i – постоянная распада ядер-предшественников; β_i – доля запаздывающих нейтронов; s – эффективная мощность источника; YB – доля запаздывающего энерговыделения в общей доле энерговыделения реактора; $\lambda_{\gamma j}$ – константы распада -группы; $\beta_{\gamma j}$ – доля запаздывающего энерговыделения j -группы; $C_{\gamma j}(t)$ – концентрация источников запаздывающего излучения; $K(T)$ – коэффициент отношения мощности элемента к мощности реактора, изменяющиеся от температуры активной зоны реактора ИГР; $YB_{\text{к.м.}}(T)$ – доля запаздывающего энерговыделения в общей доле энерговыделения конструкционного материала, зависящая от температуры реактора.

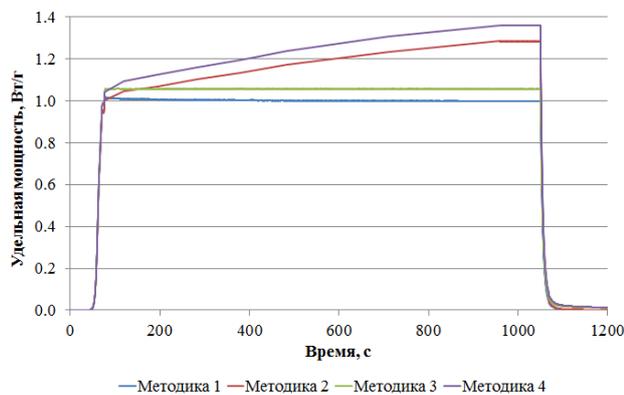
**РАСЧЕТ ДИАГРАММЫ МОЩНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА
С КОНВЕРТОРОМ НЕЙТРОНОВ**

**РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ МОЩНОСТИ
ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УСТРОЙСТВА**

На рисунке 5 представлены результаты расчета мощности твэлов конвертора с помощью каждой методики.



а) верхний твэл



б) нижний твэл

Рисунок 5. Диаграмма мощности верхнего твэла

На рисунке видно, что применение методик, учитывающих изменение коэффициента отношения мощностей от температуры активной зоны, заметно меняет профиль диаграммы и интегральное энерговыделение. В таблице 1 представлены результаты расчета интегрального энерговыделения в топливных элементах экспериментального устройства. С применением расчетных методик 2 и 4 значение выделенной энергии увеличивается на 18%. Игнорирование данного обстоятельства может привести к расплавлению топлива и не способности получения уникальных данных по спектру нейтронов, учитывая предельный режим работы реактора в испытании.

Таблица 1. Сравнение значений энерговыделения твэлов по расчетным методикам

Номер методики	Интегральное удельное энерговыделение, Дж/г	
	верхний твэл	нижний твэл
1	930	995
2	889 (-5%)	1172 (+17,8%)
3	982 (+10,5%)	1051 (-10,3%)
4	939 (-4,3%)	1239 (+17,9%)

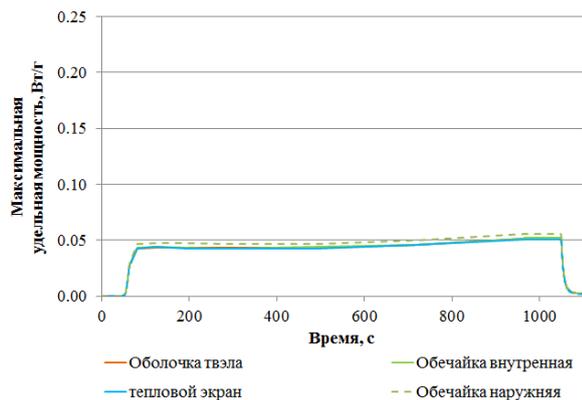
**РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ДИАГРАММЫ
МОЩНОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Энерговыделение в конструкционных материалах происходит в основном благодаря радиационному разогреву гамма излучений. В случае реактора в режиме «импульс» доля запаздывающей мощности составляет не более 10%, то в элементах конструкции конвертора доля может достигать до 26%. С помощью программы MCNP6, были рассчитаны доли запаздывающего энерговыделения во всех элементах испытательной секции (таблица 2). Результаты расчетов диаграмм мощности конструктивных элементов экспериментального устройства, с помощью описанной выше методики, представлены на рисунке 6.

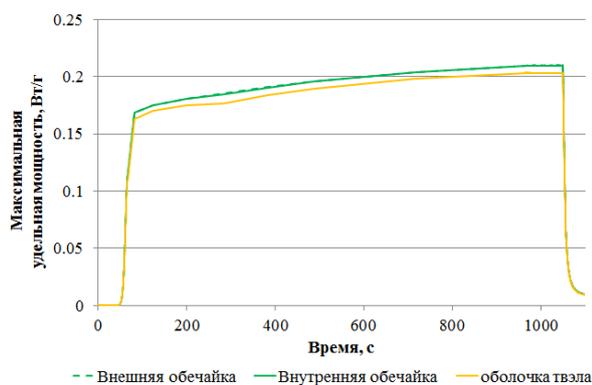
Таблица 2. Доля запаздывающего энерговыделения в конструктивных элементах конвертора от общей доли

Материал	Масса, г	Доля запаздывающего энерговыделения в зависимости от температуры АЗ ИГР							
		293 К	400 К	500 К	600 К	700 К	800 К	1000 К	1200 К
верхний твэл									
Оболочка	19	0,240	0,224	0,206	0,216	0,202	0,179	0,186	0,165
Рубашка охлаждения	108	0,165	0,174	0,154	0,155	0,139	0,126	0,132	0,118
Кадмий	185	0 (энергия выделяется мгновенно)							
Тепловой экран	147	0,146	0,154	0,144	0,139	0,128	0,129	0,118	0,112
Корпус	206	0,141	0,151	0,139	0,131	0,124	0,123	0,109	0,101
нижний твэл									
Оболочка	19	0,259	0,227	0,214	0,224	0,211	0,212	0,194	0,180
Рубашка охлаждения	108	0,252	0,238	0,225	0,223	0,216	0,200	0,196	0,186
Корпус	206	0,252	0,250	0,237	0,234	0,221	0,215	0,198	0,191
защитные чехлы									
Защитный корпус	21770	0,113	0,109	0,102	0,100	0,094	0,088	0,081	0,075
Ампула WF	117780	0,095	0,091	0,086	0,082	0,076	0,073	0,066	0,060

**РАСЧЕТ ДИАГРАММЫ МОЩНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА
С КОНВЕРТОРОМ НЕЙТРОНОВ**



а) верхний твэл



б) нижний твэл

Рисунок 6. Диаграмма мощности конструктивных элементов испытательной секции

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ДИАГРАММЫ МОЩНОСТИ ЗАЩИТНЫХ ЧЕХЛОВ

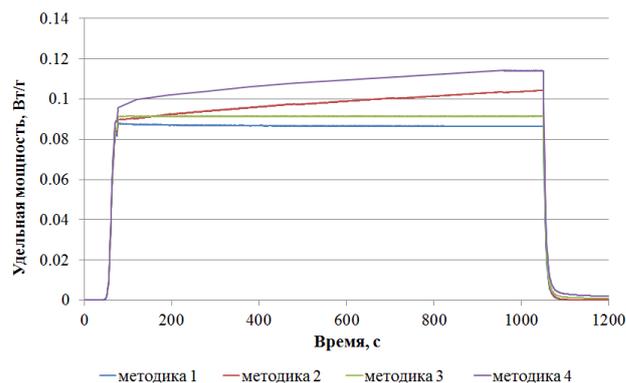
Также были проведены нейтронно-физические расчеты диаграммы мощности ампулы и защитного корпуса. Это позволяет наглядно сравнить различие в результатах расчета при учете различных физических процессов в реакторе.

Результаты расчетов энерговыделения представлены в таблице 2, диаграммы мощностей изображены на рисунке 7. Использование методики, учитывающей изменение нейтронно-физических характеристик в зависимости от температуры АЗ в ходе пуска, позволяет учесть дополнительное энерговыделение и получить более достоверную картину по изменению диаграммы мощности в пуске. Учитывая отсутствие системы охлаждения ампулы и защитного корпуса с ловушкой расплава, пренебрежение дополнительным энерговыделением подвергает опасности перегрева защитной ампулы.

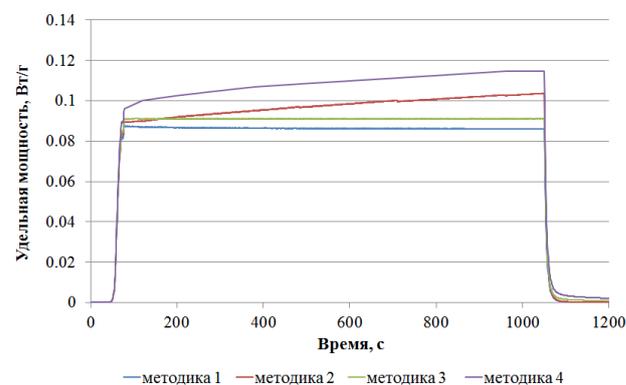
ВЫВОДЫ

По итогам выполненных расчетов можно сделать следующие выводы:

1) Разработана программа, способная рассчитывать реальную диаграмму изменения мощности реактора и распределение температуры в активной зоне;



а) ампула



б) защитный корпус

Рисунок 7. Сравнение расчетных методик по нахождению диаграммы удельной мощности объектов экспериментального устройства

2) Рассчитаны диаграммы мощности твэлов и конструкционных материалов конвертора;

3) Использование констант запаздывающего энерговыделения и способа расчета мощности позволяет увеличить точность расчетов энерговыделения в ЭУ;

4) Использование только значений мгновенной мощности при расчетах энерговыделения в экспериментальных сборках не позволяет точно описать поведение топливных элементов во время испытаний.

Использование и комбинирование методик повышает качество планируемых экспериментов.

В случае учета запаздывающего энерговыделения мощность в конструкционных материалах конвертора увеличивается от 14 до 26%. Учет всех видов энерговыделения первостепенно важен для безопасного проведения экспериментов на реакторе ИГР, во избежание аварийных ситуаций.

Работа выполнена в рамках мероприятия «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан на 2018–2020 годы», бюджетной программы «Развитие атомных энергетических проектов», тема «Исследование поведения твэлов быстрых реакторов в тяжелых авариях».

ЛИТЕРАТУРА

1. Курчатов И.В. Импульсный графитовый реактор ИГР / Курчатов И.В., Фейнберг С.М., Доллежалъ Н.А. и др. // Атомная энергия, 1964, т. 17, вып. 6, с. 463–474.
2. Котов В.М., Жанболатов О.М. Конвертор нейтронов для испытания твэлов быстрых реакторов. // Патент на изобретение РК № 33207 от 15.10.2018, бюл. № 40.
3. Котов В.М., Жанболатов О.М. Конвертер нейтронов ИГР для испытаний твэлов быстрых реакторов / Котов В.М., Жанболатов О.М. // Вестник НЯЦ РК. 2017. № 1(69). С.98–102.
4. Котов В.М. Изучение возможности проведения экспериментов в реакторе ИГР с твэлом на быстрых нейтронах / Котов В.М., Жанболатов О.М. // Вестник НЯЦ РК.– 2018.– № 4(76).– С. 18–21.
5. Котов В.М. Конвертор тепловых нейтронов в быстрые реактора ИГР. / Котов В.М., Жанболатов О.М. // V Международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики». Москва, 2-5 октября 2018, АО «НИКИЭТ». С.336–342.
6. MCNP-5.1.40 Monte-Carlo N-Particle Transport Code: Los Alamos National Laboratory; Los Alamos, New Mexico. – April 24, 2003.
7. Вурим А.Д., Котов В.М., Иркимбеков Р.А. и др. Компьютерная модель реактора ИГР для стационарных нейтронно-физических расчетов. // А.с. № 2738 РК, 27.12.2016.
8. Жанболатов О.М. Особенности расчета мощности элементов экспериментального устройства для реакторных испытаний на ИГР / Жанболатов О.М., Иркимбеков Р.А. // Вестник НЯЦ РК.– 2020.– № 2. – С. 55–60.

НЕЙТРОНДЫ ТҮРЛЕНДІРГІШІ БАР ЭКСПЕРИМЕНТТІК ҚҰРЫЛҒЫНЫҢ ҚҰАТ СЫЗБАСЫН ЕСЕПТЕУ

О.М. Жанболатов, Р.А. Иркимбеков, Н.Е. Мухамедов

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

Мақалада эксперименттік құрылғы элементтерінің қуатын есептеу әдісі сипатталған, оның негізгі мақсаты ИГР термиялық нейтрондық ағынды түрлендіру болып табылады. Бұл әдістеме эксперименттік зерттеулерді жоспарлау кезеңінде сыналған құрылғылардың құрылымдық элементтерінде энергияның бөлінуі туралы мәліметтерді алудың әртүрлі есептеу әдістерін жетілдіру болып табылады.

Түйінді сөздер: ИГР, нүктелік кинетика, реактор қуаты.

CALCULATION OF THE POWER DIAGRAM OF AN EXPERIMENTAL DEVICE WITH A NEUTRON CONVERTER

O.M. Zhanbolatov, R.A. Irkimbekov, N.E. Mukhamedov

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

The article presents a method for calculating the power of the elements of an experimental device, the main purpose of which is to convert the thermal neutron flux of the IGR. This technique is an improvement of various calculation methods for obtaining data on energy release in structural elements of tested devices at the stage of planning experimental studies.

Keywords: IGR, point kinetics, reactor power.

УДК 53.536.246

РАЗРАБОТКА ОПТИМИЗАЦИОННОЙ МОДЕЛИ В ПРОГРАММЕ ANSYS FLUENT ДЛЯ ТЕПЛООБМЕННИКА НАТРИЕВОЙ ПЕТЛИ

Хасенова С.М., Акаев А.С., Мартыненко Е.А.

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

В статье представлены расчетные исследования по решению многокритериальной задачи оптимизации натриевого теплообменника. Рассматриваемый теплообменник является одним из элементов петлевого натриевого контура (ПНК), разрабатываемого для обеспечения циркуляции натрия при проведении экспериментов на реакторе ИГР с элементами активных зон реакторов на быстрых нейтронах.

В ходе исследований был проведен математический расчет для выбора геометрических параметров теплообменного устройства и определения необходимого расхода теплоносителя. С использованием выбранных геометрических параметров создана трехмерная модель теплообменного устройства в программном комплексе *ANSYS FLUENT* и проведен стационарный тепловой расчет. В ходе трехмерного расчета получено распределение температурного поля теплообменного устройства с теплоносителями.

В результате расчетных исследований сформирован оптимальный диапазон параметров теплообменного устройства, построена трехмерная расчетная модель и получено распределение температурного поля оптимизированной модели.

Ключевые слова: теплофизический расчет, натриевый теплообменник, расчетная модель.

ВВЕДЕНИЕ

Первостепенным требованием к эксплуатации ядерных реакторов на быстрых нейтронах является безопасность. Реакторные эксперименты позволяют получить достоверные данные о поведении ядерного топлива в переходных и аварийных режимах работы. Характеристики импульсного графитового реактора (ИГР) позволяют проводить внутриреакторные эксперименты с моделированием тяжелых аварий с различными условиями. В настоящее время в Институте атомной энергии РГП НЯЦ РК, в рамках экспериментальной программы SAIGA, проводятся работы по разработке экспериментального устройства, натриевого контура и обоснования проведения экспериментов.

Петлевой натриевый контур (ПНК) предназначен для обеспечения циркуляции разогретого жидкого натрия через экспериментальное устройство, установленное в центральном экспериментальном канале реактора ИГР, при подготовке и проведении внутриреакторных экспериментальных исследований топлива и элементов активных зон реакторов с натриевым теплоносителем. ПНК представляет собой замкнутый циркуляционный контур подготовки натрия и разомкнутый контур подачи и отвода натрия из экспериментального устройства, размещенного в центральном экспериментальном канале (ЦЭК) реактора ИГР. Натриевый контур будет также использоваться для обкатки технологий насосов, парогенераторов, теплообменников и других устройств, предназначенных для ядерных реакторов на быстрых нейтронах.

Одним из элементов натриевого контура является теплообменное устройство. Внешний вид расчетной модели теплообменного устройства приведен на рисунке 1 [1]. Рассматриваемый на рисунке теплообменник – змеевиковый. Этот аппарат состоит из вер-

тикального цилиндрического стального корпуса. Внутри корпуса расположен змеевик, состоящий из стальной трубы, свернутой в виде спирали (змейки). Концы змеевика выходят из корпуса через крышки. Теплообмен в аппарате происходит через стенки змеевика. По каналу проходит воздух, а натрий прокачивается через змеевик.

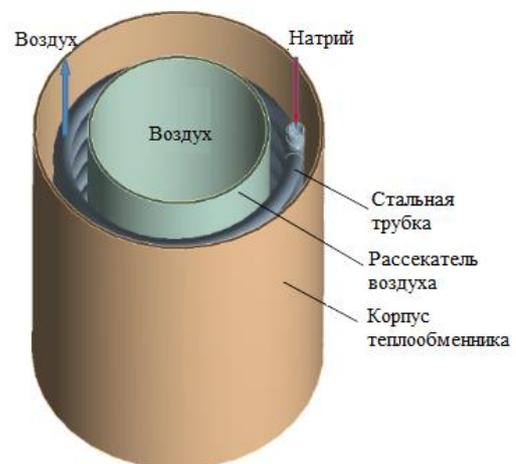


Рисунок 1. Расчетная модель теплообменного устройства

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Основными задачами работы является разработка расчетной модели натриевого теплообменника с оптимизированными геометрическими параметрами и определение необходимого расхода охлаждающего воздуха. На первом этапе решения задач выполняется поверочный расчет в программе *MathCAD*. Целью данного расчета является определение геометрических параметров при заданном расходе теплоносителя.

Исходные данные для проведения расчета:

- температура подачи натрия в теплообменник, °С 450;
- температура натрия на выходе из теплообменника, °С 190;
- расход натрия, л/ч 220;
- максимальное давление в контуре натрия, кгс/см² 4.

В качестве материала трубного элемента выбрана сталь, в качестве теплоносителя – натрий.

Для определения геометрических параметров теплообменника необходимо вычислить коэффициент теплопередачи от охлаждаемого теплоносителя к нагреваемому через стенку [2]

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{на}} \cdot d_1} + \frac{\ln(d_2/d_1)}{2 \cdot \lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}} \cdot d_2}}, \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{на}}$ – коэффициент теплоотдачи потока натрия, Вт/(м²·°С); d_1 – внутренний диаметр трубки теплообменника, м; $\lambda_{\text{ст}}$ – коэффициент теплопроводности стальной трубки, Вт/(м·°С); d_2 – наружный диаметр трубки теплообменника, м; $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи в воздух, Вт/(м²·°С).

Логарифмический перепад температуры между потоками при противотоке

$$\Delta t = \frac{(t_{\text{на1}} - t_{\text{в2}}) - (t_{\text{на2}} - t_{\text{в1}})}{\ln\left(\frac{t_{\text{на1}} - t_{\text{в2}}}{t_{\text{на2}} - t_{\text{в1}}}\right)}, \quad (2)$$

где $t_{\text{на1}}$, $t_{\text{на2}}$ – температура натрия на входе и выходе из теплообменника соответственно, °С; $t_{\text{в1}}$, $t_{\text{в2}}$ – температура воздуха на входе и выходе из теплообменника соответственно, °С; $t_{\text{в1}}$ – температура воздуха на входе в теплообменник, К.

Длина трубки теплообменника

$$L = \frac{Q}{\Delta t \cdot \pi \cdot k_l}, \quad (3)$$

где Q – тепловой поток, Дж.

В результате проведенного математического расчета были выбраны геометрические параметры теплообменника, приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Основные геометрические параметры теплообменника

Параметр	Значение
Внутренний диаметр трубки теплообменника, м	0,02
Толщина стенки трубки теплообменника, м	0,002
Угол атаки теплоносителя (воздух), град.	85
Расстояние между витками теплообменника, м	0,056
Число витков, шт.	8
Общая высота витков теплообменника, м	0,448
Высота теплообменника, м	0,528
Длина трубки завитой части теплообменника, м	8,05
Общая длина трубки теплообменника, м	8,15

На рисунке 2 приведена расчетная модель теплообменного устройства с основными геометрическими параметрами.

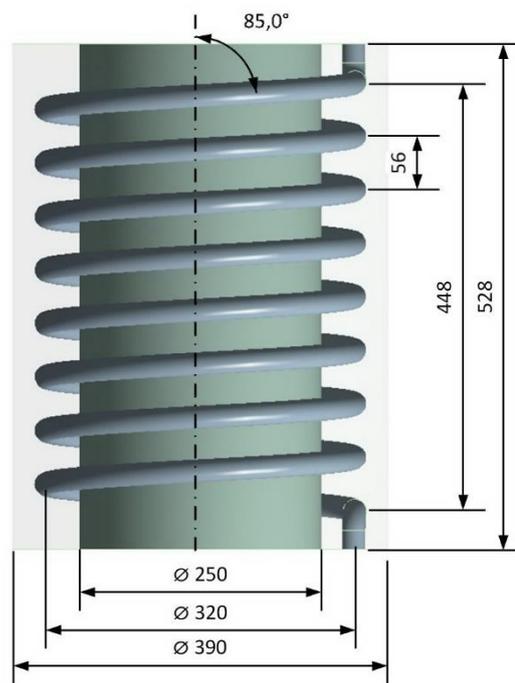


Рисунок 2. Расчетная модель теплообменника без внешнего корпуса

На втором этапе проведен трехмерный расчет теплообменного устройства при помощи программного комплекса *ANSYS FLUENT* [3], реализующего метод конечных элементов. Теплофизические свойства материалов для проведения расчетов взяты из справочной литературы [4] и заданы в виде функциональной зависимости от температуры. Результаты расчетов теплообменника с указанными геометрическими параметрами (рисунок 2, таблица 1) и противотоком теплоносителей показывают, что при расходе воздуха, равном 0,86 кг/с, среднее значение температуры натрия и воздуха на выходе из теплообменника равны 190,1 °С и 48,4 °С соответственно. На рисунке 3 приведено температурное поле натрия, температура приведена в градусах Цельсия. В таблицу 2 сведены параметры теплоносителей.

Таблица 2. Параметры теплоносителей

Параметр	Значение
Температура натрия на входе в теплообменник, °С	450
Температура воздуха на входе в теплообменник, °С	25
Температура натрия на выходе из теплообменника, °С	190,1
Температура воздуха на выходе из теплообменника, °С	48,4
Расход воздуха, кг/с	0,86
Расход натрия, кг/с	0,054
Направление теплоносителей	противоток

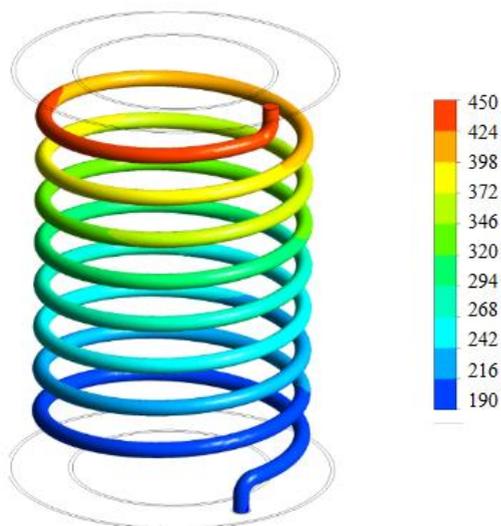


Рисунок 3. Распределение температурного поля натрия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работ по данной теме получены следующие результаты:

- сформирован оптимальный диапазон управляемых параметров: высота теплообменника, длина трубки завитой части теплообменника, общая длина трубки теплообменника, число витков, расстояние между витками теплообменника, внутренний диаметр трубки теплообменника, толщина стенки трубки теплообменника;
- разработана расчетная модель теплообменного устройства натриевой петли с решением многокритериальной задачи оптимизации;
- определены расход и распределение значений температуры теплоносителей.

Полученное теплообменное устройство может быть рассмотрено в качестве одного из возможных вариантов для комплектации петлевого натриевого контура.

ЛИТЕРАТУРА

1. Служебная записка «О проведении расчета»/ филиал ИАЭ РГП НИЦ РК. Хаметов С.З., Пахниц А.В., Богомолова И.Н. - Курчатова, 2019. - 2 с №33-470-02/4079 от 19.12.2019.
2. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М.: «Энергия», 1977.
3. ANSYS release 14.5 Documentation for ANSYS WORKBENCH: ANSYS Inc. – Электрон. дан. и прогр. – [Б. м.], 2014.
4. Чиркин В.С., «Теплофизические свойства материалов ядерной техники», М.:АТОМИЗДАТ.– 1968.

НАТРИЙ ТҰЗАҒЫНЫҢ ЖЫЛУ АЛМАСТЫРҒЫШЫНА АРНАЛҒАН ANSYS FLUENT БАҒДАРЛАМАСЫНДА ОҢТАЙЛАНДЫРУ МОДЕЛІН ӘЗІРЛЕУ

С.М. Хасенова, А.С. Акаев, Е.А. Мартыненко

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

Мақалада натрий жылу алмастырғышты оңтайландырудың көп критериалды міндеттерді шешу бойынша есептік зерттеулер ұсынылды. Қарастырылатын жылу алмастырғыш жылдам нейтрондарда реакторлардың активтік аймақтардың элементтері бар ИГР реакторында эксперименттерді жүргізу кезінде натрийдің циркуляциясын қамтамасыз ету үшін әзірленетін тұзақты натрий контурының (ТНК) элементтерінің бірі болып табылады.

Зерттеу барысында жылу тасымалдағыштың қажетті шығынын анықтау және жылу алмастырғыш құрылысының геометриялық параметрларын таңдау үшін математикалық есеп жүргізілді. Таңдалған геометриялық параметрларды пайдаланумен ANSYS FLUENT бағдарламалық кешесінде жылу алмастырғыш құрылысының үш өлшемді моделі құрылды және стационарлық жылу есебі жүргізілді. Үш өлшемді есептеу барысында жылу тасымалдағыштары бар жылу ауыстырғыш құрылысының температуралық өрісінің үйлестіруі алынды.

Есептік зерттеулер нәтижесінде жылу алмастырғыш құрылысының параметрларының тиімді диапазоны қалыптастырылды, үш өлшемді есептік модель салынды және оңтайландыру моделінің температуралық өрісін үйлестіруі алынды.

Түйінді сөздер: жылу физикалық есеп, натрий жылу алмастырғыш, есептік модель.

DEVELOPMENT OF OPTIMIZED MODEL FOR SODIUM LOOP HEAT EXCHANGER IN ANSYS FLUENT PROGRAM

S.M. Khasenova, A.S. Akaev, Ye.A. Martynenko

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

The article addresses computational research on the decision of multi-criterial problem of how to optimize sodium heat exchanger. A heat exchanger under consideration is one of the elements of sodium loop (SL) being designed to provide sodium circulation in the IGR reactor experiments with fast reactor core elements.

The research covered mathematical calculation to select geometry for heat exchanger and identify required coolant flow rate. In *ANSYS FLUENT* software system, heat exchanger 3D model was developed using chosen geometry and stationary thermal calculation was conducted. Distribution of heat exchanger temperature field with the coolants was received in 3D calculation.

Computational research resulted in receiving best range of heat-exchanger parameters, creating 3D computational model and providing distribution of temperature field for optimized model.

Keywords: thermal-physical calculation, sodium heat-exchanger, computational model.

УДК 620.172

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА СПЛАВА ЦИРКОНИЯ Э125 В ЗОНЕ ЛОКАЛЬНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Сапатаев Е.Е., Кожаметов Е.А., Даулетханов Е.Д.

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

dauletkhanov@nnc.kz

В работе приведены результаты механических испытаний по определению изменений прочностных характеристик материала циркониевого сплава Э125 после локального термического воздействия. Определены зависимости прочностных характеристик материала сплава Э125 от твердости. Определены максимальные и минимальные значения прочности в зонах оплавления и термического воздействия. Выполнена оценка изменения геометрических параметров и твердости пятна термического воздействия от режимов дугового воздействия и условий последующего охлаждения.

Ключевые слова: термические испытания, испытания на растяжение, твердость, прочность.

ВВЕДЕНИЕ

Особое место в ядерной энергетике и ядерной промышленности занимает проблема создания и модернизации конструкционных материалов с оптимальной микроструктурой и высокими эксплуатационными свойствами [1]. Циркониевые сплавы широко используются в качестве конструкционных материалов изделий активных зон (АЗ) ядерных энергетических установок (ЯЭУ), которые эксплуатируются в жестких условиях воздействия облучения, высоких температур, тепловых и механических нагрузок, теплоносителя и других неблагоприятных факторов [2]. Стойкость к этим воздействиям в значительной степени определяет работоспособность активной зоны в целом.

Параметры эксплуатации компонентов активных зон ядерных реакторов регламентированы в соответствующих паспортах изделий. Вместе с тем продолжается поиск технологических и конструкторских решений по оптимизации параметров работы и повышению безопасности и экономичности энергетических и исследовательских реакторов. В частности, предусматривается существенно увеличить время эксплуатации и выгорание топлива в тепловыделяющих сборках (ТВС) при обеспечении безопасности работы эксплуатируемых ядерных реакторов в целом. Создание экономичных и безопасных ядерных реакторов, а также модернизация действующих ЯЭУ во многом зависят от выявляемых резервов работоспособности циркониевых сплавов, используемых в конструктивных элементах АЗ. Для определения этих резервов необходимо знать свойства изделий из циркониевых сплавов при различных условиях, имитирующих или моделирующих режимы эксплуатации действующих и усовершенствованных активных зон ЯЭУ, главным образом экстремальных температурных воздействиях при аварии с потерей теплоносителя. Авария приводит к нагреву до температур 900–1200°C и окислению, что после последующего резкого охлаждения приводит к охрупчиванию [3–5]. Получение таких сведений о циркониевых материалах

при температурно-силовых воздействиях может не только повлиять на изменение регламентированных режимов работы изделий в ЯЭУ, но и в совокупности с другими аспектами реакторостроения инициировать работы по оптимизации технологии производства и конструирования АЗ [6–7]. По этой причине изучение эксплуатационных свойств этих сплавов при воздействии агрессивных сред и высоких температур, а также проблема предотвращения разрушения оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) при условиях аварии с потерей теплоносителя является важнейшей задачей материаловедения в области циркониевых сплавов для атомной энергетики.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются фрагменты листового материала сплава циркония марки Э125. Для термического испытания были подготовлены образцы размерами 50×24×2 мм в количестве 6 шт. С целью идентификации на каждый образец была нанесена маркировка гравированием с указанием номера серий и порядкового номера. Максимальное отклонение фактических геометрических размеров от заданного не превышает 3%.

Термические испытания образцов циркониевого сплава Э125 осуществлялось с помощью аппарата для аргонодуговой сварки. Суть термических испытаний образцов заключалась в локальном скоростном нагреве до плавления в течение 1±2 с и охлаждение в различной среде (воздух, аргон и вода). Параметры термических испытаний приведены в таблице 1.

Определение высоты профиля в зоне оплавления проводилось с использованием контактного профилометра *Mitutoyo SJ-410* в режиме безопорного измерения.

Определение микротвердости по Виккерсу проводилось на автоматическом твердомере *Q10A+ (Qness)* при нагрузке на индентор 9,8 Н. Микротвердость определялась по ширине участка термического воздействия на обратной стороне образца. Количест-

**ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА СПЛАВА ЦИРКОНИЯ Э125
В ЗОНЕ ЛОКАЛЬНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

во измеряемых отпечатков на каждом образце составляло более 15 шт.

Таблица 1. Параметры термического испытания образцов сплава Э125

№ образца	Сила тока, А	Время контакта, с	Среда остывания
3.1	200	1	воздух
3.2	200	1	аргон
3.3	300	1	аргон
3.4	300	2	аргон
3.5	300	2	вода
3.6	300	1	вода

Для испытания на растяжение были подготовлены испытательные образцы в виде полосы номинальным размером (Д×Ш×Т) 50×5×1,5 мм, и отобраны так, чтобы зона оплавления была расположена посередине их рабочей части. С целью формирования равномерного распределения напряжений в образце при растяжении было произведено его утонение шлифовкой с лицевой и обратной сторон на основе данных по профилю высоты. Разделку образца выполняли на электроискровом станке типа 4531 без деформации и нагрева.

Для определения прочностных характеристик были проведены механические испытания при комнатной температуре на универсальной испытательной машине *Tinius Olsen 50ST*. Расчет прочностных и пластических характеристик осуществлялся в программ-

ной среде *Horizon* согласно ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытани на растяжение»[8]. Испытание проводилось при постоянной скорости перемещения активного захвата 5 мм/мин.

Предел прочности при растяжении ($\sigma_{\text{растяж.}}$) рассчитывали по формуле:

$$\sigma_{\text{растяж.}_i} = \frac{P_i}{S}, \quad (1)$$

где P_i – разрушающая нагрузка на образец, кН; S – номинальная площадь поперечного сечения, мм².

Площадь поперечного сечения вычисляли по формуле:

$$S = b \times h, \quad (2)$$

где b – ширина образца, м; h – толщина образца, м.

По результатам серий испытаний определяется погрешность величины предела прочности (доверительный интервал) по следующей формуле:

$$\Delta\sigma_{\text{растяж.}} = t_{\text{ст}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\overline{\sigma_{\text{растяж.}}} - \sigma_{\text{растяж.}_i})^2}{n(n-1)}}, \quad (3)$$

где, n – число измерений; $t_{\text{ст}}$ – коэффициент Стьюдента ($\alpha=0,95$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Фотография поверхности образцов и линейные размеры участка термического воздействия представлены на рисунке 1 и в таблице 2.

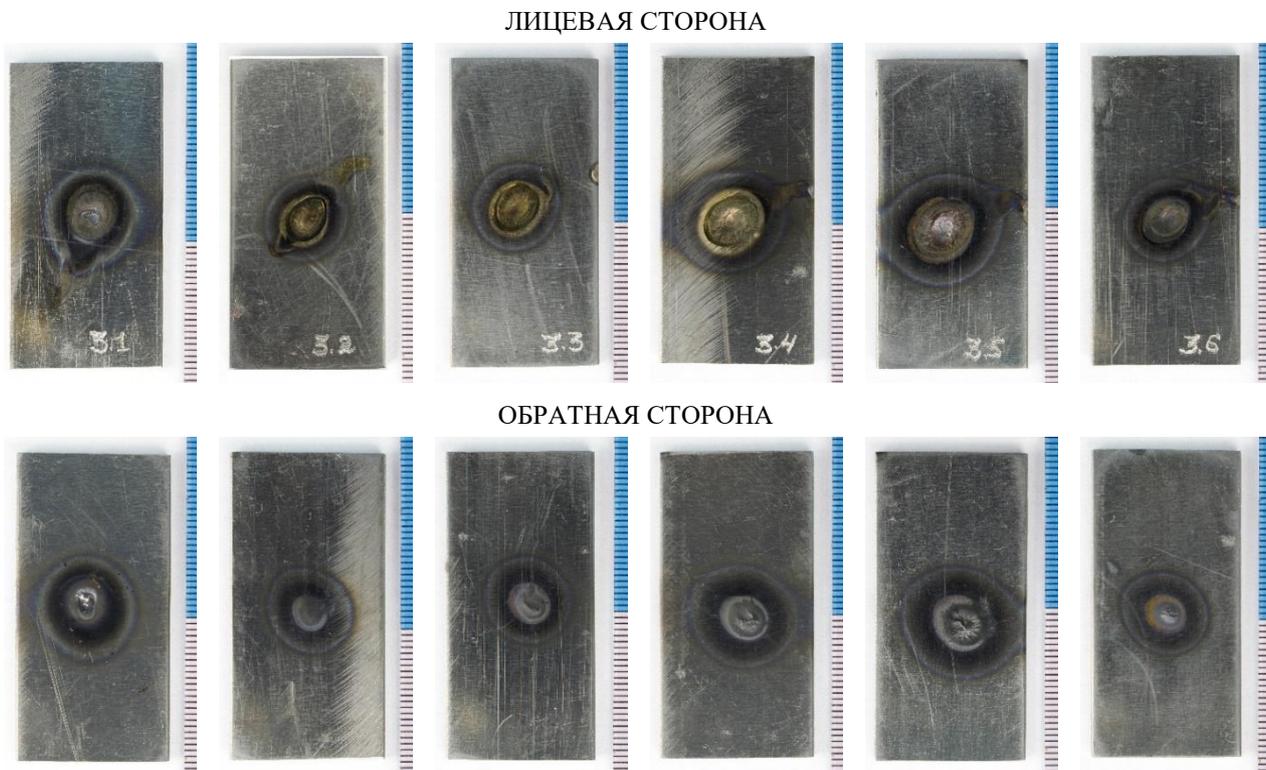


Рисунок 1. Фотография внешнего вида образцов после термических испытаний

**ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА СПЛАВА ЦИРКОНИЯ Э125
В ЗОНЕ ЛОКАЛЬНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Таблица 2. Геометрические параметры пятна термического воздействия

№ образца	Лицевая сторона		Обратная сторона	
	диаметр оплавленного участка, мм	ширина зоны термического влияния, мм	диаметр оплавленного участка, мм	ширина зоны термического влияния, мм
3.1	7,6	18,8	4,3	19,7
3.2	6,9	15,0	-	15,5
3.3	7,7	15,9	2,0	16,2
3.4	8,4	18,6	3,5	19,6
3.5	9,5	20,1	4,7	20,2
3.6	7,3	15,7	2,9	15,1

Участок термического воздействия состоит из зоны оплавления и зоны термического влияния. Со стороны аргонодугового воздействия (лицевая сторона) в центре зоне оплавления образуется кратер, а по периферии выступ из вытесненного расплавленного материала. На обратной стороне образца также формируется зона оплавления меньшего размера в основном виде выступа.

К зоне термического влияния относится участок металла, не подвергшийся расплавлению, структура и свойства которого изменились в результате нагрева. На поверхности металла в зоне термического влияния формируются цвета побежалости.

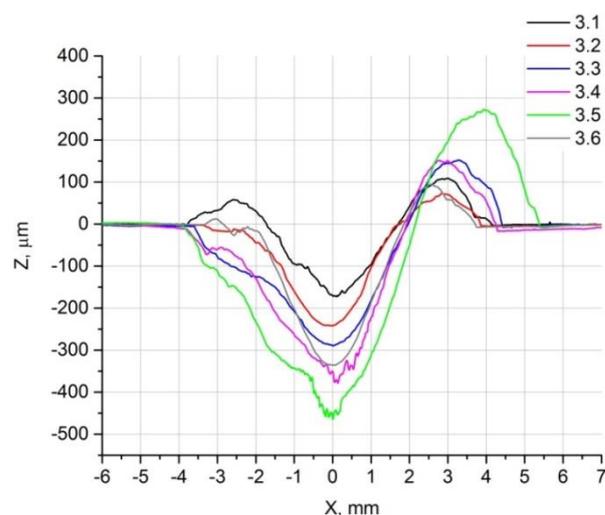
Увеличение силы тока и длительности контакта дуги с поверхностью образцов приводит к увеличению линейных размеров оплавленного участка и зоны термического влияния.

Распределение высоты профиля в зоне оплавления на лицевой и обратной сторонах образцов представлены на рисунке 2. Как видно из рисунков, с изменением параметров термического испытания изменяется размеры повреждаемых участков. С увеличением силы тока и время контакта, в центре зоне оплавления образуется кратера большей глубиной и диаметром.

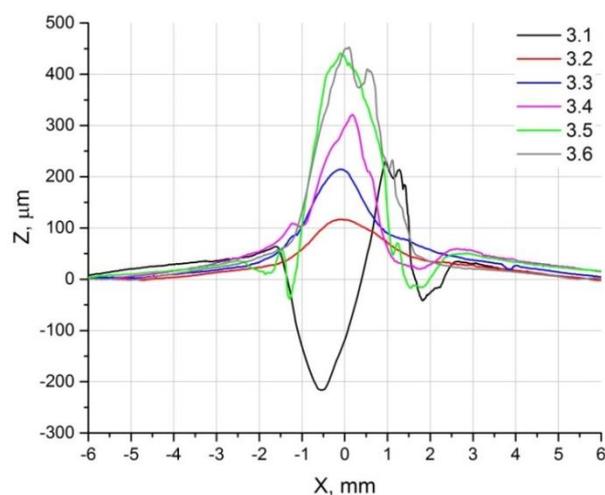
На рисунке 3 представлены результаты определения твердости по ширине пятна термического воздействия.

Не зависимо от параметров термического воздействия на всех образцах наблюдается заметное повышение твердости в переходной зоне между зоной оплавления и основным металлом. В образцах (3.4, 3.5), испытанных при повышенной силе тока дуги ($I=300$ А) наблюдается заметное повышение твердости в переходной зоне между зоной оплавления и основным металлом, в зоне оплавления снижение твердости.

Характер распределения твердости коррелирует с линейными параметрами пятна термического воздействия. Охлаждение в воде после термического воздействия способствует повышению максимального значения твердости на 5–10% по сравнению с охлаждением в потоке аргона.



а)



б)

Рисунок 2. Распределение высоты профиля в зоне оплавления на лицевой (а) и обратной (б) сторонах образцов

Образец (3.1), охлажденный в воздухе после термического воздействия, по сравнению с образцами, охлажденными в воде и потоке аргона, имеет заниженное значение твердости в зоне термического влияния, а в зоне оплавления – повышенное значение (рисунок 3).

На рисунке 4 и в таблице 3 представлены результаты механических испытаний на растяжение образцов сплава Э125 в исходном и после термических воздействия. Во всех образцах после термического воздействия разрушение происходит на границе зоны термического воздействия с основным металлом. А пятно термического воздействия практически не деформируется, что подтверждает его высокие прочностные характеристики (рисунок 5). Предел прочности образцов практически не изменяется. Лишь относительное удлинение уменьшается на 10–17% по сравнению с исходным материалом.

**ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА СПЛАВА ЦИРКОНИЯ Э125
В ЗОНЕ ЛОКАЛЬНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

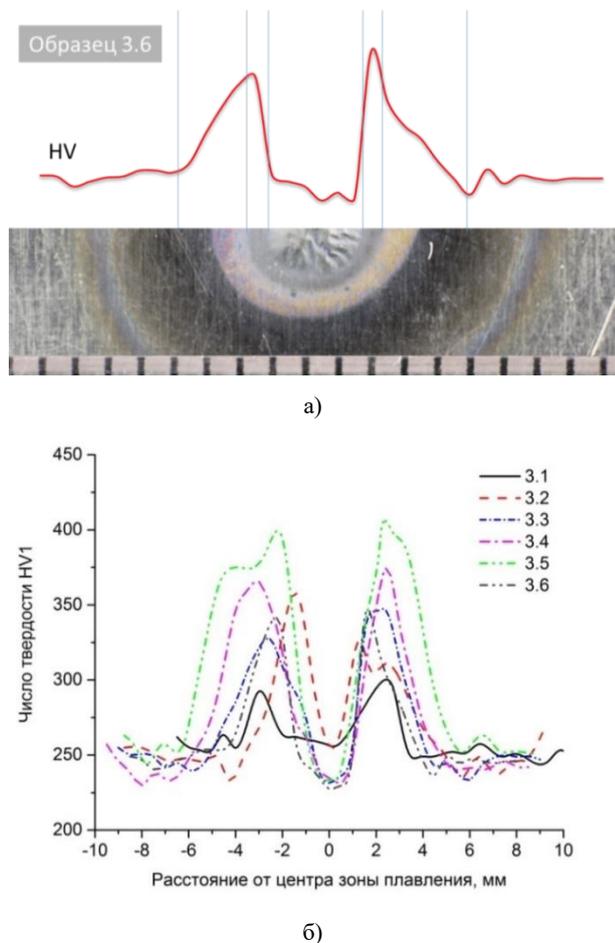


Рисунок 3. Распределение твердости по ширине пятна термического воздействия

Таблица 3. Механические свойства материала сплава Э125 до и после термических испытаний

Усл. название образцов	Предел прочности (σ_b), МПа	Предел текучести ($\sigma_{0,2}$), МПа	Отн. удлинение (δ_5), отн.ед.
Э125_исходный	631	555	0,284
3.1	649	585	0,253
3.2	639	578	0,248
3.3	653	595	0,240
3.4	634	566	0,257
3.5	628	564	0,241
3.6	632	562	0,236

Так как все образцы при механических испытаниях разрушаются на границах зоны термического влияния с основным материалом, не предоставляется возможным определить прочностные характеристики в зонах оплавления и термического влияния. Поэтому дополнительно были проведены термические испытания в интервале температур от 600 °С до 1100 °С для определения зависимости прочностных характеристик от твердости.

Из фрагментов листового материала сплава Э125 были изготовлены плоские образцы (тип II по

ГОСТ 11701-84) для испытания на растяжение с расчетной длиной 25 мм. Разделка фрагментов осуществлялась на ленточнопильном и электроискровом станках.

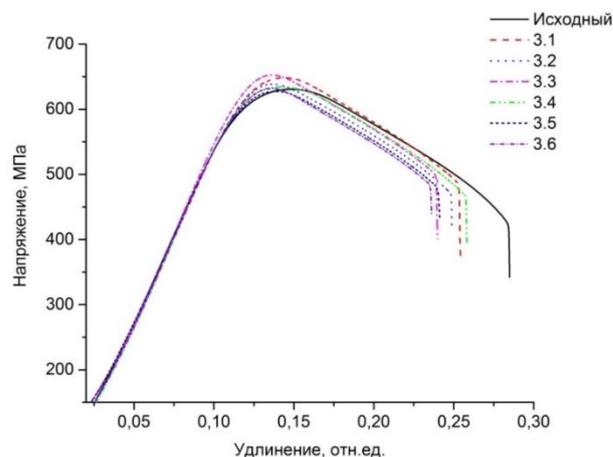


Рисунок 4. Диаграмма растяжения материала сплава Э125 после термического воздействия

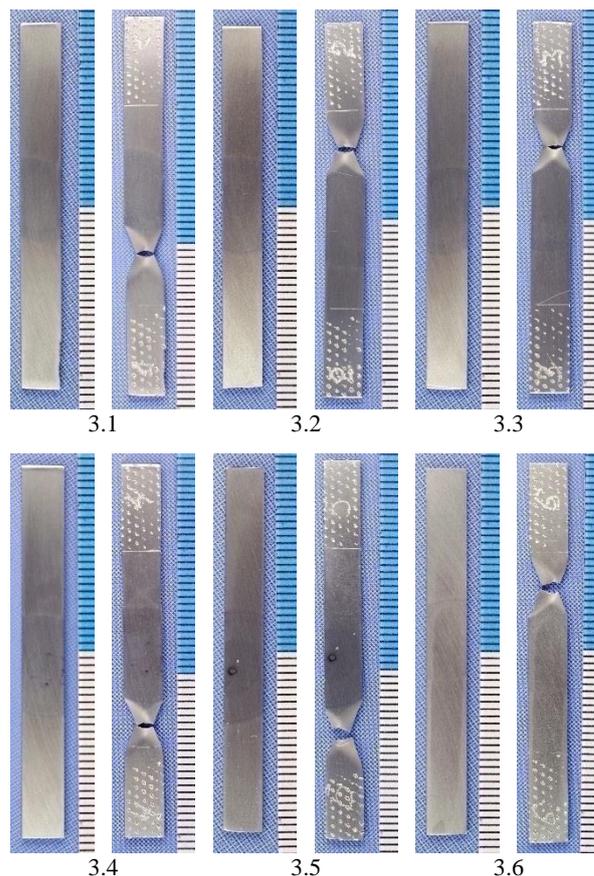


Рисунок 5. Фотография внешнего вида испытательных образцов до и после разрушения

Суть термических испытаний образцов заключалась в быстром нагреве, выдержке при заданной температуре в течение 10 минут (от 600 °С до 1100 °С с шагом 100 °С) и охлаждении в воде.

Нагрев и выдержку осуществляли в камере мuffleльной электропечи *СНОЛ 8,2/1100*, предварительно нагретой до требуемой температуры. После изотермической выдержки в течение 10 мин. выполнялось охлаждение в воде.

После термических испытаний были определены прочностные характеристики и твердость образцов циркониевого сплава Э125.

Определение твердости после термических воздействии в диапазоне температур от 600 °С до 1100 °С осуществлялось на автоматическом твердомере *Qness Q60A+* по методу Бринелля при нагрузке на индентор 300 Н. В результате термообработки при температуре 600 °С наблюдается резкое снижение твердости по сравнению с исходным (без термического испытания) состоянием. Дальнейшее увеличение температуры испытания приводит к заметному увеличению твердости (рисунок 6).

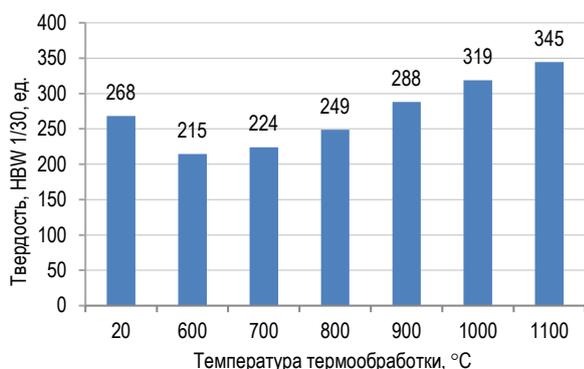


Рисунок 6. Зависимость изменение твердости от температуры термического испытания

Испытание на растяжение проводилось при постоянной скорости перемещения активного захвата 5 мм/мин. На рисунке 7 представлена условная диаграмма растяжения в исходном состоянии и после термических воздействии при различных температурах.

В исходном состоянии материал листового проката сплава Э125 имеет значительную прочность и низкую пластичность (см. таблицу 4).

В результате нагрева и быстрого охлаждения при температуре 600 °С наблюдается резкое снижение прочности и повышение пластичности по сравнению с исходным (без термического испытания) состоянием. Дальнейшее увеличение температуры испытания

до 900 °С приводит к заметному упрочнению и охрупчиванию материала сплава Э125. В интервале температур испытания от 900 °С до 1100 °С в материале сплава практически сохраняются прочностные и пластические характеристики (рисунок 8).

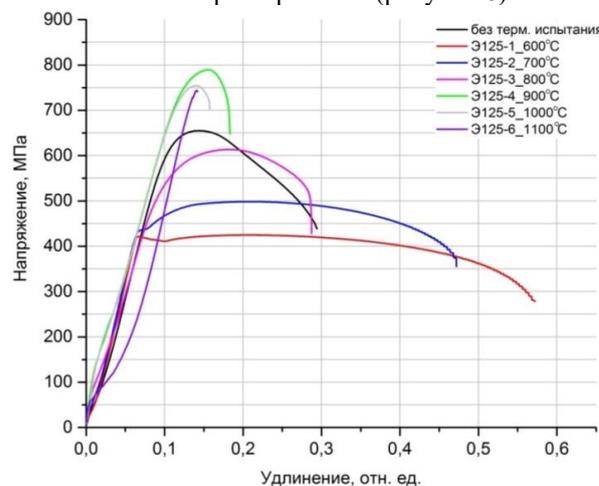


Рисунок 7. Условная диаграмма растяжения материала сплава Э125 после термического воздействия

В результате анализа данных по прочностным характеристикам и твердости сплава Э125 после термообработки в интервале температуры от 600 °С до 1100 °С выявлено хорошее корреляционное соотношение (рисунок 9) между твердостью (HV) и пределом текучести (σ_T) с коэффициентом детерминации $R^2 \approx 0,82$:

$$\sigma_{0,2} = 1,7551 \cdot HV + 9,784, \quad (4)$$

Также существует линейная зависимость (5) между твердостью и пределом прочностью (σ_B) в узком интервале твердости 220÷290 HV:

$$\sigma_B = 4,5972 \cdot HV - 547,56. \quad (5)$$

При «экстремальных» условиях термического воздействия (образец № 3.5) максимальная твердость в зоне термического влияния достигает 417 HV1, а применяя вышеприведенное соотношение (4) предел текучести может составить 742 МПа. При этом, минимальное значение твердости 224 HV1 зафиксировано в зоне оплавления образца № 3.6, где прочностные характеристики соответствуют $\sigma_{0,2} = 403$ МПа и $\sigma_B = 517$ МПа.

Таблица 4. Механические свойства материала сплава Э125 до и после термических испытаний

Усл. название образцов	Температура испытания, °С	Предел прочности (σ_B), МПа	Предел текучести ($\sigma_{0,05}$), МПа	Отн. удлинение (δ_5), %	Отн. сужение (ψ), %
Э125_исходный	до испытания	654	424	15,7	28
Э125-3	600	425	411	41,1	62
Э125-4	700	498	436	32	51
Э125-5	800	613	399	3,8	28
Э125-6	900	789	553	2,4	9
Э125-7	1000	755	554	1,6	5
Э125-8	1100	744	639	1,3	0

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА СПЛАВА ЦИРКОНИЯ Э125 В ЗОНЕ ЛОКАЛЬНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

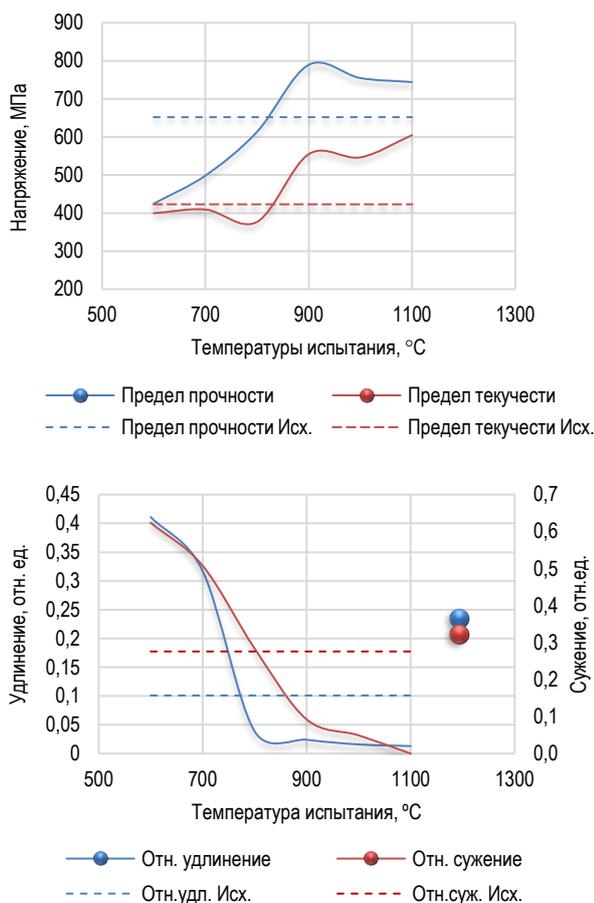


Рисунок 8. Зависимости изменения механических свойств от температуры термического испытания

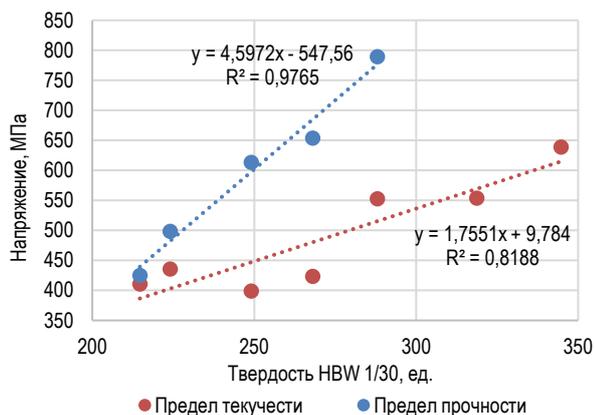


Рисунок 9. Соотношение между твердостью и пределом текучести сплава циркония Э125 в термообработанном состоянии

Также, применяя вышеприведенную формулу (5), были определены прочностные характеристики по

характерным зонам после термического воздействия (рисунок 10). Как видно из рисунка, прочность оплавленной зоны по сравнению зоной термического влияния имеет пониженное значение. Зона термического влияния обладает более высокими прочностными характеристиками, так как при нагреве и охлаждении на этом участке образуется мелкозернистая структура.

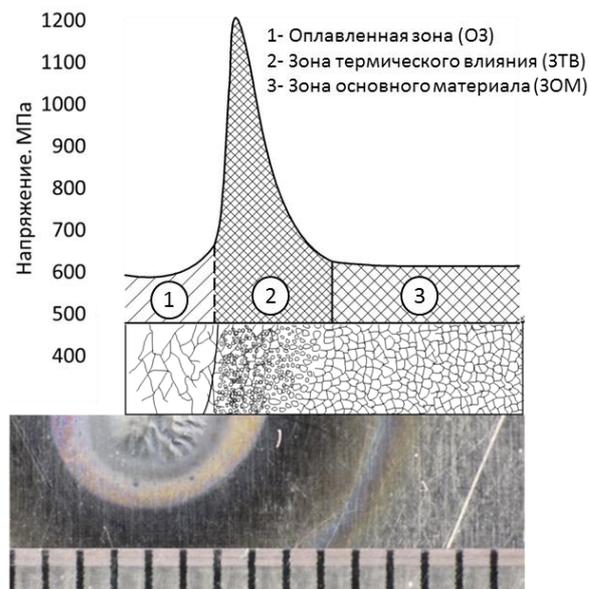


Рисунок 10. Изменения прочности по характерным зонам термического воздействия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате определения прочностных характеристик циркониевого сплава Э125 после термического воздействия при различных режимах можно сделать следующие выводы:

- Обнаружено, что после локального термического воздействия при различных параметрах испытаний формируется зона оплавления и зоны термического воздействия.

- Независимо от параметров термического воздействия на всех образцах наблюдается заметное повышение твердости в переходной зоне, между зоной оплавления и основным металлом, тогда как в зоне оплавления зафиксировано снижение твердости по сравнению с твердостью основного материала.

- Установлена линейная зависимость прочностных характеристик основного материала от числа твердости.

- В результате установленной зависимости прочностных характеристик от твердости, были определены прочностные характеристики по характерным зонам термического воздействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булышко Д.Ю. Механические свойства и деформационное поведение циркониевых сплавов ZR-1Nb и ZR-2,5Nb в ультрамелкозернистом состоянии // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: эл. сб. ст. по мат. XXVII междунар. студ. науч.-практ. конф. № 12(26). URL: [http://sibac.info/archive/technic/12\(26\).pdf](http://sibac.info/archive/technic/12(26).pdf) (дата обращения: 27.03.2020).
2. Займовский, А.С. Циркониевые сплавы в атомной энергетике / А.С. Займовский, А.В. Никулина, Н.Г. Решетников // М.: Энергоиздат. – 1981.
3. Mardon, J.P. Influence of Composition and Fabrication Process on Out-of-Pile Properties of M5 Alloy / J.P. Mardon, D. Charquet and J. Senevat // Zirconium in the Nuclear Industry: 12th Int. Symp. ASTM STP 1354. – 2000. – P. 505–524.
4. Влияние импульсного лазерного облучения на структуру поверхностных слоев циркониевых сплавов / [Кириченко В. Г., Кирдин А. И., Коваленко Т. А., Остапов А. В.] // Вісник Харківського національного університету. Сер. фізична «Ядра, частинки, поля». – 2007. – № 777. – Вип. 2/34/. – С. 41–50
5. Shcherbakov E.N., Averin S.A., Sinelnikov L.P., Kozlov A.V., Asiptsov O.I., Shikhalev V.S., Panchenko V.L., Tsygvintsev V.A. Experimental Studies of Э-125 Alloy Physical Properties After Long-Term Use in RBMK // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы // № 1 (68–69), 2007 С. 322–334
5. Foster, J.P. ZIRLOTM. Cladding Improvement / J.P. Foster, K. Yueh and R.J. Comstock // Zirconium in the Nuclear Industry: 15th Int. Symp. ASTM STP 1505. – 2009. – P. 457 – 469 (Journal of ASTM International, Vol. 5, No. 7, paper ID JAI101188)
6. Kobylansky, G.P. Irradiation-Induced Growth and Microstructure of Recrystallized, Cold Worked and Quenched Zircaloy-2, NSF, and E635 Alloys / G.P. Kobylansky, A.E. Novoselov, Z.E. Ostrovsky et al. // Zirconium in the Nuclear Industry: 15th Int. Symp. ASTM STP 1505. -2009. - P. 564-582 (Journal of ASTM International. Vol. 5, No. 4, Paper ID JAI101115).
7. ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытание на растяжение»./ Юридическая фирма «Интернет и Право» URL: <https://www.internet-law.ru/gosts/gost/4616/> (дата обращения: 2.04.2020).
8. ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу. Часть 1. Метод измерения // АО Консорциум «Кодекс» URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200060184> (дата обращения: 2.04.2020).

ЖЕРГІЛІКТІ ТЕРМИЯЛЫҚ ӘСЕР АЙМАҒЫНДА Э125 ЦИРКОНИЙ ҚОРЫТПАСЫ МАТЕРИАЛЫНЫҢ БЕРІКТІЛІК ҚАСИЕТТЕРІН БАҒАЛАУ

Е.Е. Сапатаев, Е.А. Кожакметов, Е.Д. Даулетханов

ҚР ҰАО РМК «Атом энергия институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Бұл жұмыста жергілікті термиялық әсерден кейінгі Э125 цирконий қорытпасы материалының беріктілік қасиеттерінің өзгерісін анықтау бойынша механикалық сынақ нәтижелері келтірілген. Балқу және термиялық әсер аймақтарында беріктіліктің максималды және минималды мәндері анықталды. Э125 қорытпасы материалының беріктілік қасиеттерінің қаттылықтан тәуелділігі анықталды. Доға әсерінің режиміне және кейінгі суыту шарттарына байланысты термиялық әсер дағының қаттылығы және геометриялық параметрлерінің өзгерісін бағалау бойынша жұмыстар орындалды.

Түйінді сөздер: термиялық сынау, созу сынағы, қаттылық, беріктілік.

ESTIMATION OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF THE ZIRCONIUM E125 ALLOY MATERIAL IN THE ZONE OF LOCAL THERMAL EXPOSURE

Ye.Ye. Sapatayev, Ye.A. Kozhakhmetov, Ye.D. Daulet Khanov

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

The paper presents the results of mechanical tests to determine changes in the strength characteristics of the material of zirconium alloy E125 after local thermal exposure. Dependences of the strength characteristics of the material of the E125 alloy on the hardness are determined. The maximum and minimum values of strength in the zones of reflow and heat exposure have been determined. An assessment of the change in the geometric parameters and the hardness of the heat-affected spot from the modes of arc action and the conditions of subsequent cooling is carried out.

Keywords: thermal tests, tensile tests, hardness, strength.

УДК 658.562.3: 621.791.05

ОПЫТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОЖУХА НАРУЖНОГО НЕПОДВИЖНОЙ АМПУЛЫ НА-228 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ИГР

Акболатов Е.Ж., Богомолова И.Н., Коровиков А.Г., Шевченко А.М.

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

В статье представлен технологический цикл изготовления наружного кожуха неподвижной ампулы НА-228 импульсного графитового реактора (ИГР) из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Представлены результаты расчета на прочность элементов конструкции и технология изготовления обечайки. Путем сварки контрольных образцов определены оптимальные параметры сварки сегментов обечайки, а также количества прихваток и слоев, порядок и количество проходов, обеспечивающие высокое качество изделия.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений деятельности филиала ИАЭ РГП НЯЦ РК является проведение реакторных экспериментальных исследований в обоснование безопасности реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем при тяжелой аварии с плавлением топлива активной зоны. Данные исследования проводятся на исследовательском реакторе ИГР. Водоохлаждаемое экспериментальное устройство располагается в центральном экспериментальном канале реактора с неподвижной ампулой НА-228. Конструктивно неподвижная ампула состоит из трех вставляемых один в другой цилиндрических кожухов – наружный, разделительный и внутренний.

Наружный кожух изготовлен из циркониевого сплава Э125 и представляет собой обечайку цилиндрической формы, герметизируемую сваркой. Эксплуатация кожуха происходит при постоянном воздействии радиационного облучения, внутреннего давления и термических воздействиях. Надежность кожуха во многом зависит от качества сварных соединений, так как нарушение их герметичности при эксплуатации может привести к выходу охлаждающей жидкости наружу и возникновению аварийной ситуации.

Для повышения эффективности использования реактора ИГР и снижения зависимости условий его эксплуатации от комплектующих устройств было решено изготовить запасной кожух наружный из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, как альтернативу циркониевому.

В обоснование возможности применения нержавеющей стали в качестве материала наружного кожуха, выполнены нейтронно-физические и теплофизические расчеты неподвижной ампулы НА-228 с наружным кожухом из нержавеющей стали и циркониевого сплава, а также проведена оценка эксплуатационных характеристик реактора. Расчеты показали возможность применения в составе неподвижной ампулы НА-228 кожуха наружного из нержавеющей стали.

Разработана и утверждена конструкторская документация с обоснованием прочности элементов конструкции стального кожуха, а также разработана технология изготовления и сварки обечайки. Результатом настоящей работы является готовое изделие, соответствующее всем требованиям конструкторской документации.

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ

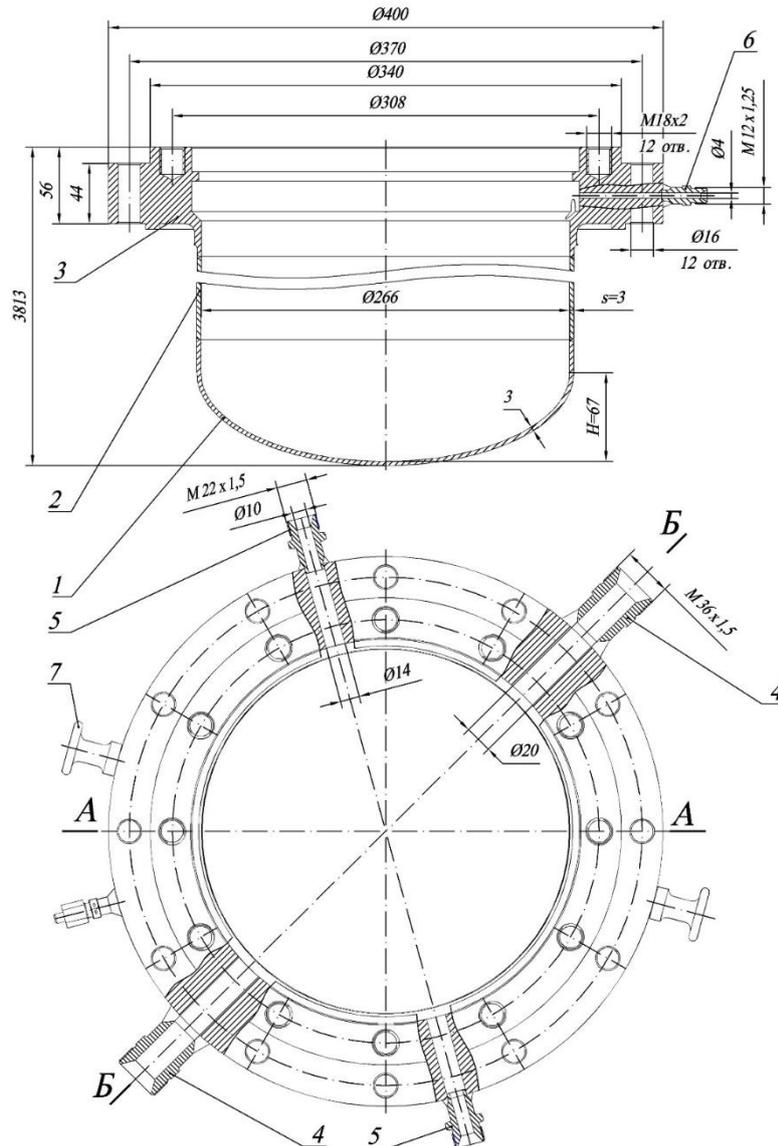
Расчет на прочность элементов конструкции наружного кожуха (рисунок 1) был выполнен согласно нормам ПНАЭ Г-7-002-86 [1]. Исходные данные для расчетов приведены в таблице 1. Результаты расчетов коэффициента запасов прочности приведены в таблице 2.

Таким образом, прочность элементов кожуха наружного обеспечивается при параметрах коэффициента запаса, указанных в таблице 2.

Таблица 1. Исходные данные

Расчетное давление кожуха наружного, кгс/мм ²	внутреннее	0,12
	наружное	0,006
Расчетная температура, °С	кожуха наружного	350
	цапфы (рисунок 1, поз.7)	20
	шпильки (рисунок 1, поз. 3), гайки (рисунок 2, поз.6), гаек накидных (рисунок 2, поз. 2, 6, 9), прокладок (рисунок 2, поз. 7, 8)	100
	фланца накидного (рисунок 2, поз. 4)	50
Материалы	кожух наружный (рисунок 2, поз. 1), фланец накидной (рисунок 2, поз. 4), гайки (рисунок 2, поз. 5)	сталь 12Х18Н10Т, ГОСТ 5632-2014
	гайки накидные (рисунок 2, поз. 2, 6, 9), шпильки (рисунок 1, поз. 3)	сплав 12ХН35ВТ, ГОСТ 5632-2014
	кольцо уплотнительное (рисунок 2, поз. 7)	резина ИРП-1375, ТУ 38-1051082-86
	прокладка (рисунок 2, поз. 8)	фторопласт Ф-4, ГОСТ10007-80

**ОПЫТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОЖУХА НАРУЖНОГО НЕПОДВИЖНОЙ АМПУЛЫ НА-228
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ИГР**

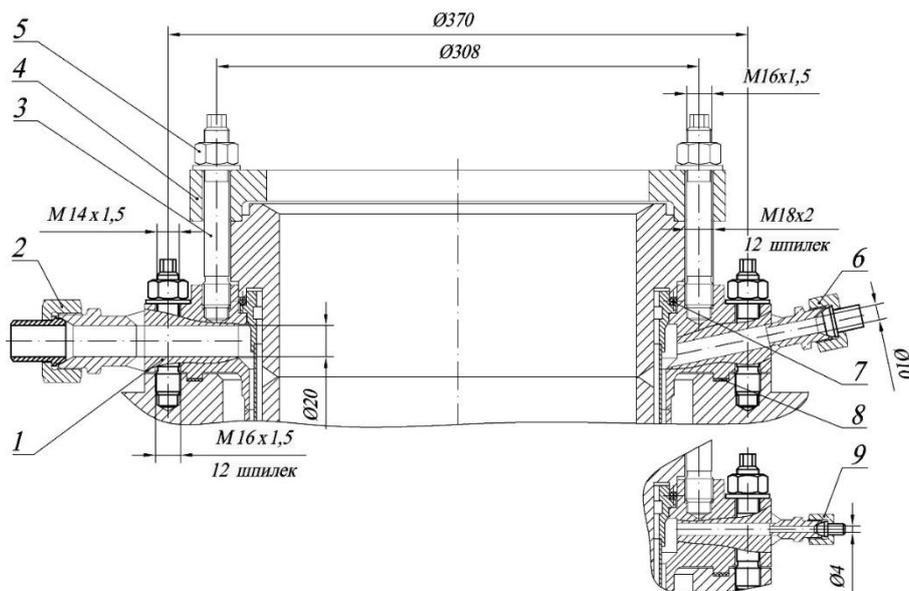


1 – днище; 2 – обечайка; 3 – фланец; 4 – штуцер Ду20; 5 – штуцер Ду10; 6 – штуцер Ду4; 7 – цапфа

Рисунок 1. Кожух наружный

Таблица 2. Коэффициент запаса прочности элементов конструкции

Элементы конструкции наружного кожуха		Коэффициент запаса прочности	Элементы конструкции наружного кожуха		Коэффициент запаса прочности
Прочность кожуха наружного при расчетном давлении 0,12 кгс/мм ² и расчетной температуре 350 °С	обечайка (внутреннее давление)	1,52	Прочность крепежных элементов при расчетном давлении 0,12 кгс/мм ² и расчетной температуре 100 °С	шпилька М18×2–М16×1,5 на разрыв	2,47
	обечайка (наружное давление)	1,75		резьба шпильки М16×1,5	3,97
	фланец	1,28		резьба гайки М16×1,5	2,24
	днище	1,51		резьба гайки накидной М12×1,25	8,11
	резьба М18×2 во фланце	1,99		резьба гайки накидной М22×1,5	8,00
	штуцер Ду4	25,21		резьба гайки накидной М36×1,5	13,36
	резьба М12×1,25 штуцера Ду4	2,24		фланец накидной	2,50
	штуцер Ду10	40,57		цапфа	1,88
	резьба М22×1,5 штуцера Ду10	2,33			
штуцер Ду20	23,32				
резьба М36×1,5 штуцера Ду20	4,03				



1 – кожух наружный; 2 – гайка накидная M36×1,5; 3 – шпилька M18×2–M16×1,5; 4 – фланец накидной; 5 – гайка M16×1,5; 6 – гайка накидная M22×1,5; 7 – кольцо уплотнительное; 8 – прокладка; 9 – гайка накидная M12×1,25

Рисунок 2. Элементы НА-228

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОЖУХА НАРУЖНОГО

Днище и фланец были изготовлены на токарном станке из проката круглого сечения (рисунок 3). Для изготовления обечайки были рассмотрены два метода. Первый – из листового материала на трехвалковой листогибочной машине. Основными недостатками данного метода являются наличие прямого участка после гибки и большая вероятность деформации обечайки после сварки продольного шва, которая усложняет получение высокоточного изделия. В связи с этим для изготовления обечайки был выбран второй метод – обработка резанием, который заключается в механической обработке трубы с размерами, близкими к готовой обечайке, на токарном станке. Применение такого метода обеспечивает высокую точность изделия и качество поверхности, так как после механической обработки свариваемые кромки получаются ровными без вмятин, выступов и заусенцев, что благоприятно влияет на качественное формирование сварного шва.

В качестве заготовки для обечайки выбрана труба диаметром 273 мм с толщиной стенки 6 мм по ГОСТ 9941-81 [2]. При длине обечайки 3630 мм трубу разбили на 6 сегментов, стыкуемые между собой сваркой (рисунок 4). Перед началом работ каждый сегмент проходил ультразвуковой контроль на наличие внутренних дефектов (трещин, пустот, неметаллических включений), после этого осуществлялась механическая обработка и сварка. Для растачивания внутреннего диаметра трубы был разработан специальный резец длиной 900 мм.

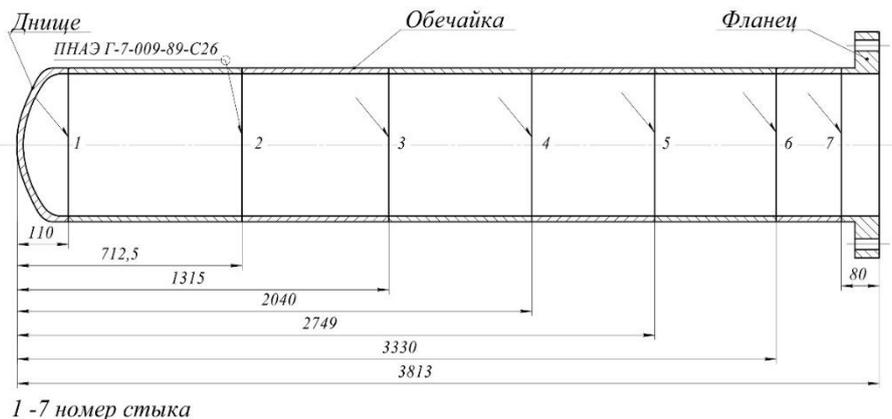


а)



б)

Рисунок 3. Изготовление фланца (а) и днища (б)



1 - 7 номер стыка

Рисунок 4. Сегменты обечайки



Рисунок 5. Растачивание внутреннего диаметра обечайки после сварки сегмента

Механическую обработку, а также сборку и сварку производили на токарно-винторезном станке ДИП-500 с использованием люнетов. Во избежание паралин и деформаций на поверхности сегментов во время вращения на станке были использованы съемные фланцевые крепления под кулачки люнетов (рисунок 5).

ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ СЕГМЕНТОВ ОБЕЧАЙКИ

В качестве способа сварки была выбрана аргонодуговая сварка неплавящимся электродом с применением присадочной проволоки марки Св-04Х19Н11М3. В целях определения оптимальной погонной энергии, которая способствует уменьшению величины внутренних деформаций и для получения заданных геометрических размеров готового изделия, а также для оценки технологических свойств сварочных материалов была проведена сварка контрольных образцов на разных параметрах режима сварки. По анализу полученных результатов визуально-измерительного и радиографического контроля были определены оптимальные параметры сварки (таблица 3), а также количества прихваток и слоев, количество проходов и порядок сварки. Необходимо

отметить, что стандартное сопло горелки не обеспечило защиту сварочной ванны от воздействия воздуха, так как в радиографических снимках контрольных образцов были обнаружены черные пятна, предположительно это свидетельствует об образовании окислов. В связи с этим была использована газовая линза с увеличенным диаметром сопла.

Таблица 3. Оптимальные параметры сварки

Параметр	Слой		
	прихватка	корневой	облицовочный
Диаметр вольфрамового электрода, мм	2,4	2,4	2,4
Диаметр присадочной проволоки, мм	2	2	2
Сила тока, А	50	60	60
Род и полярность сварочного тока	постоянный ток, прямой полярности		
Расход аргона в горелку, л/мин	8-10	8-10	8-10

Для достижения точности изделия и соосности сегментов обечайки, конструкция стыка была выполнена в соответствии с ПНАЭ Г-7-009-89 тип С26 с ос-

тающимся подкладным кольцом (рисунок 6) [3]. Сборка сегментов была выполнена с помощью прихваток. Для соединения каждого сегмента между собой было выполнено 16 прихваток длиной 10–15 мм, располагающиеся симметрично по периметру свариваемых кромок. Порядок прихваток приведен на рисунке 7. Для минимизаций тепловложения, сварку осуществляли с перерывами между проходами. Таким образом, сварку корневого слоя выполнили за 16 проходов, длина каждого прохода при этом составляя 70–80 мм, а облицовочный слой – за 6 проходов длиной 170–180 мм (рисунок 8). После каждого прохода выдерживали время для остывания сварного шва до комнатной температуры. Сварку сегментов обечайки начинали со стыка № 1 (рисунок 4). После сварки каждого сегмента обечайки производили чистовое растачивание подкладного кольца, тем самым доводя диаметр обечайки до номинальных значений (рисунок 5). Контроль величины диаметра осуществляли с помощью специально изготовленного калибра пробки. Качества сварных соединений оценивали капиллярным и радиографическим методом послойно в объеме 100%.

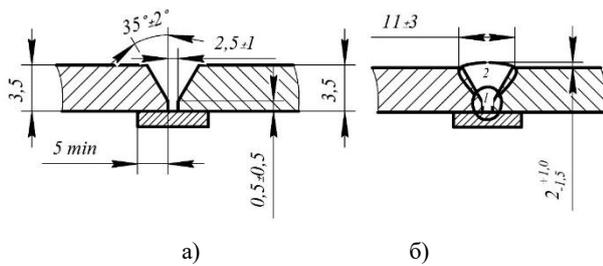


Рисунок 6. Стыковое соединение (С26) по ПНАЭ Г-7-009-89: конструкция соединения (а) и конструктивные элементы шва (б)

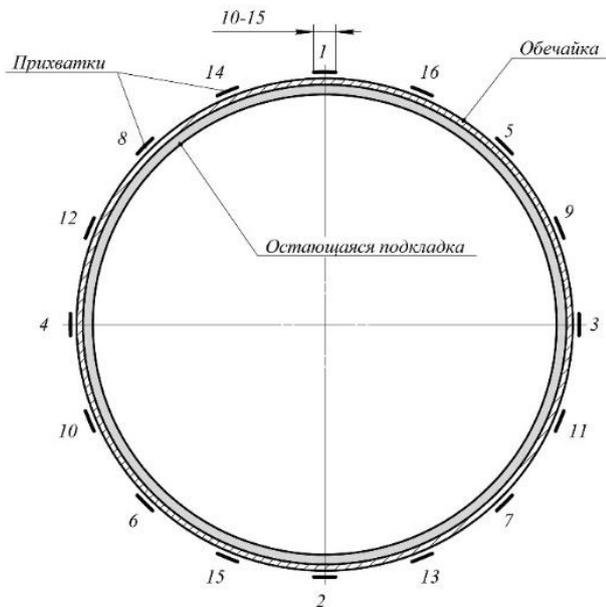


Рисунок 7. Порядок прихваток

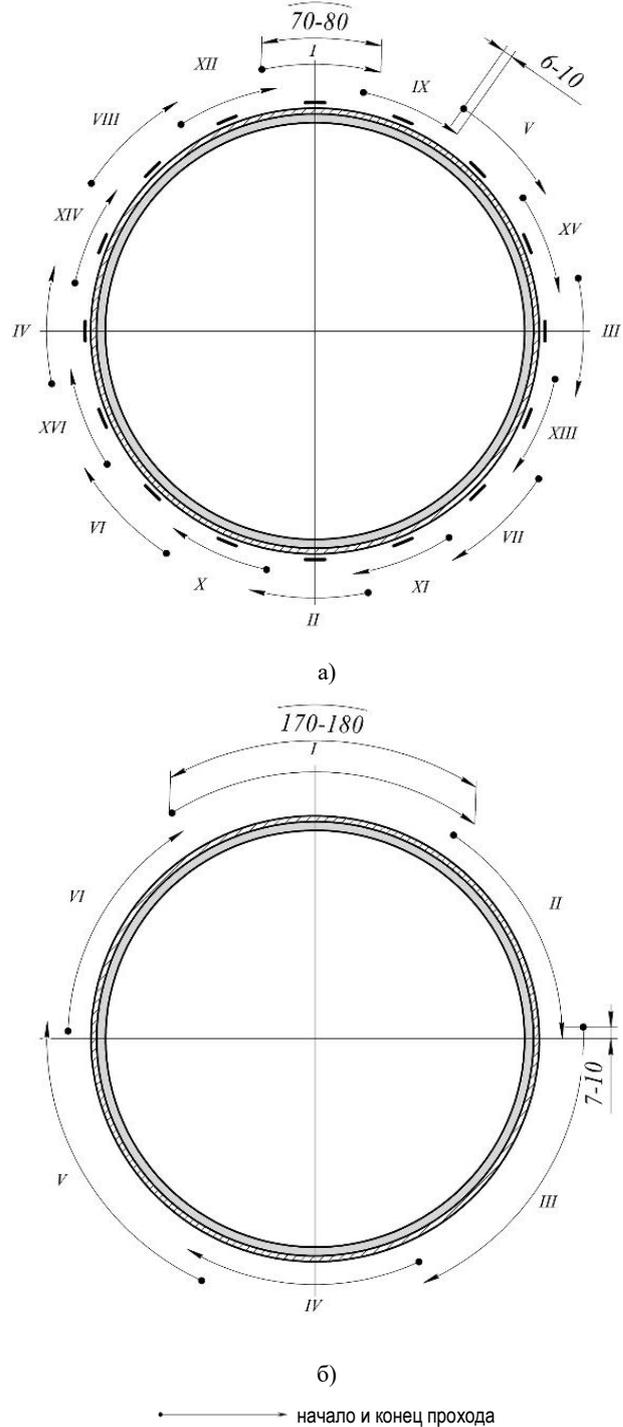


Рисунок 8. Количество и порядок проходов для корневого (а) и облицовочного (б) слоя

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы разработана конструкторская документация на кожух наружный неподвижной ампулы центрального экспериментального канала реактора ИГР с обечайкой из нержавеющей стали, которая прошла согласование в Комитете по атомному и энергетическому надзору и контролю МЭ РК.



Рисунок 9. Готовая обечайка кожуха наружного

Проведена сравнительная оценка нейтронно-физических характеристик реактора и экспериментального устройства, а также оценка теплового состояния для обоснования возможности применения в составе неподвижной ампулы НА-228 стального кожуха наружного.

Проведен расчет на прочность элементов конструкции, подтверждающий необходимый запас прочности.

Разработан и применен технологический процесс и технология сварки, которые позволили изготовить стальной кожух наружный в короткие сроки на имеющемся станочном оборудовании. Контроль качества показал, что кожух соответствует всем требованиям конструкторской документации.

После изготовления кожух прошел гидравлические испытания и передан для эксплуатации на комплекс исследовательского реактора ИГР под регистрационным номером Т-311.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок: ПНАЭ Г-7-002-86: утв. Госатомнадзором СССР: введ. в действие 01.07.87. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
2. ГОСТ 9941-81. Трубы бесшовные холодно- и теплодеформированные из коррозионно-стойкой стали. – Введ. 1983-01-01. – М.: Стандартинформ, 2010. – 8 с.
3. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения: ПНАЭ Г-7-009-89: утв. Госатомнадзором СССР: введ. в действие 01.06.90. – М.: НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России, 2000. – 185 с.

НА-228 ИГР ЗЕРТТЕУ РЕАКТОРЫНЫҢ СЫРТҚЫ ЖЫЛЖЫМАЙТЫН АМПУЛАСЫНЫҢ ҚАБЫН ЖАСАУ ТӘЖІРИБЕСІ

Е.Ж. Ақболатов, И.Н. Богомолова, А.Г. Коровиков, А.М. Шевченко

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

Мақалада 12X18H10T тоттанбайтын болаттан НА-228 импульстік графиттік реактордың (ИГР) жылжымайтын ампуласының сыртқы қабын дайындау технологиялық циклы ұсынылған. Белдікті жасау технологиясы мен конструкция элементтері беріктігіне есептеу нәтижелері ұсынылды. Бақылау үлгілерін дәнекерлеу жолымен белдік сегменттерін дәнекерлеу тиімді параметрлары, сондай –ақ ілмектер мен қабаттардың саны, өнімнің жоғары сапасын қамтамасыз ететін өту жолдарының саны анықталды.

EXPERIENCE IN MANUFACTURING OF THE OUTER CASING OF AN IMMOVABLE AMPOULE NA-228 OF THE IGR RESEARCH REACTOR

Ye.A. Akbolatov, I.N. Bogomolova, A.G. Korovikov, A.M. Shevchenko

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

The article presents the technological cycle of manufacturing the outer casing of an immovable ampoule NA-228 of the Pulsed Graphite Reactor (IGR) made of stainless steel 12X18H10T. The results of strength analysis of structural elements and casing manufacturing technology are presented. By welding control samples, the optimal welding parameters of the casing segments were determined, as well as the number of tacks and layers, order and number of passes ensuring high product quality.

УДК 621.039.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В ОБРАЗЦАХ БЕТОНА ИТЭР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНАА НА РЕАКТОРЕ ИВГ.1М

Медетбеков Б.С., Попов Ю.А., Прозорова И.В.

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

Настоящая работа посвящена определению примесей в образцах бетона - конструкционного материала реактора ИТЭР. Представлены результаты реакторных экспериментов и спектрометрических исследований. Облучение образцов для инструментального нейтронно-активационного анализа проводилось на реакторе ИВГ.1М. Пост анализ включал гамма спектрометрические измерения с различной выдержки образцов от одних суток до одного месяца, с расчетом концентрации основных и примесных элементов относительным методом ИНАА. Для сравнения в качестве стандартных образцов использовались горные породы типа СГ-4 и СГД. Был выполнен анализ погрешностей при проведении инструментального нейтронно-активационного анализа на реакторе ИВГ.1М. В результате проведенных исследований определено содержание элементов, которые могут вносить основной вклад в радиационную обстановку в помещениях при эксплуатации и декомиссии ИТЭР.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для анализа различных материалов наряду с классическими методами аналитической химии используются такие ядерно-физические методы как атомно-абсорбционная спектрометрия, рентгено-флуоресцентный анализ, атомная эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, синхротронное излучение, нейтронно-активационный анализ и другие. По проведенному сравнительному анализу можно сказать, что наиболее чувствительными являются радиофизические методы [1, 2].

Инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА) является одним из предпочтительных методов, так как он позволяет, во-первых, получать информацию по большому числу элементов [3] и, во-вторых, ИНАА позволяет получить качественный и количественный анализ на наличие тех и иных элементов, содержащихся в исследуемом образце с хорошей точностью. В наши дни ИНАА применяется в различных сферах народного хозяйства: в геологии, в медицине, в археологии, в криминалистике и в экологии как эффективный инструмент для определения элементного состава любого образца-вещества и в любом агрегатном состоянии [4–9].

В работе [10], посвященной наведенной активности и активационным характеристикам бетонов радиационной защиты показано что, эти свойства определяются содержанием химических элементов, концентрация которых в исходных компонентах бетонов может изменяться от тысячных долей до процентов по массе. Для снижения активности и объемов радиоактивных отходов выбор защитных бетонов ядерных установок должен происходить с учетом наполнения состава бетона активационно-опасными элементами. Поэтому авторы обосновали необходимость и возможность создания банка данных по активационным характеристикам конструкционных и защитных материалов для ядерных установок. В результате на ос-

нове данных расчетно-экспериментальных исследований выделены важнейшие химические элементы, определяющие долгоживущую наведенную активность защитных бетонов, разработаны структура, содержание и информационная составляющая банка данных по активационным характеристикам защитных бетонов ядерных установок.

Наша исследовательская работа заключалась в изучении активационных характеристик бетонов различных марок, которые будут использованы при эксплуатации и декомиссии ИТЭР. Работа была проведена в 2019 году в рамках международного договора между Республикой Казахстан и организации ИТЭР.

В ходе подготовки к ИНАА было выполнено ряд задач: полученные образцы бетонов из Франции (г. Кадараш) необходимо было подготовить специальным способом – измельчить до состояния порошка; разработать ампульное устройство для облучения; провести все необходимые нейтронно-физические и теплофизические расчеты. Далее было проведено облучение отобранных, взвешенных и маркированных образцов в потоке тепловых нейтронов в реакторе ИВГ.1М., гамма-спектрометрические измерения образцов и расчет концентрации элементов на наличие интересующих примесей.

ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ ДЛЯ РЕАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Керн бетона марки М8В (рисунок 1-а), используемый в качестве конструкционного материала реактора ИТЭР, как уже указано выше, был получен из Франции с площадки строительства ИТЭР в г. Кадараше. Перед облучением на реакторе керн прошел специальную процедуру гомогенизации. Процедура включала в себя ряд этапов:

- вырезку дисковых заготовок толщиной 7–8 мм вблизи верхней и нижней оснований керна (см. рисунок 1-б и 1-в);
- сушку заготовок в сушильном шкафу в течение 2 часов;

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В ОБРАЗЦАХ БЕТОНА ИТЭР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНАА НА РЕАКТОРЕ ИВГ.1М

– полное дробление, измельчение материала вырезанных дисковых заготовок до получения порошка с размером частиц менее 400 мкм.

– гомогенизацию (перемешивание) полученного порошкообразного материала и отбор представительной пробы;

– полное дробление, измельчение представительной пробы до получения порошка с размером частиц менее 50 мкм.

– гомогенизацию (перемешивание) полученного порошкообразного материала, сушку в сушильном шкафу (муфельной печи) при температуре 110 °С в течение 2 часов.

– взвешивание полученного порошкообразного препарата, упаковку и маркировку.

Иллюстрации процедур подготовки и внешнего вида материала приведены на рисунке 2.

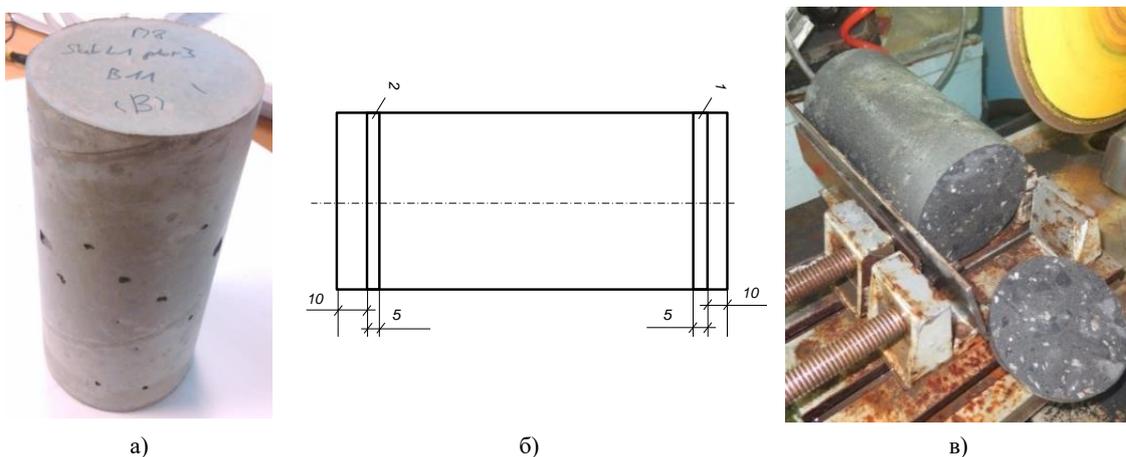


Рисунок 1. Керн бетона марки М8В предназначенный для анализа (а), схема вырезки (б) и вырезка дисковой заготовки из керна бетона (в)

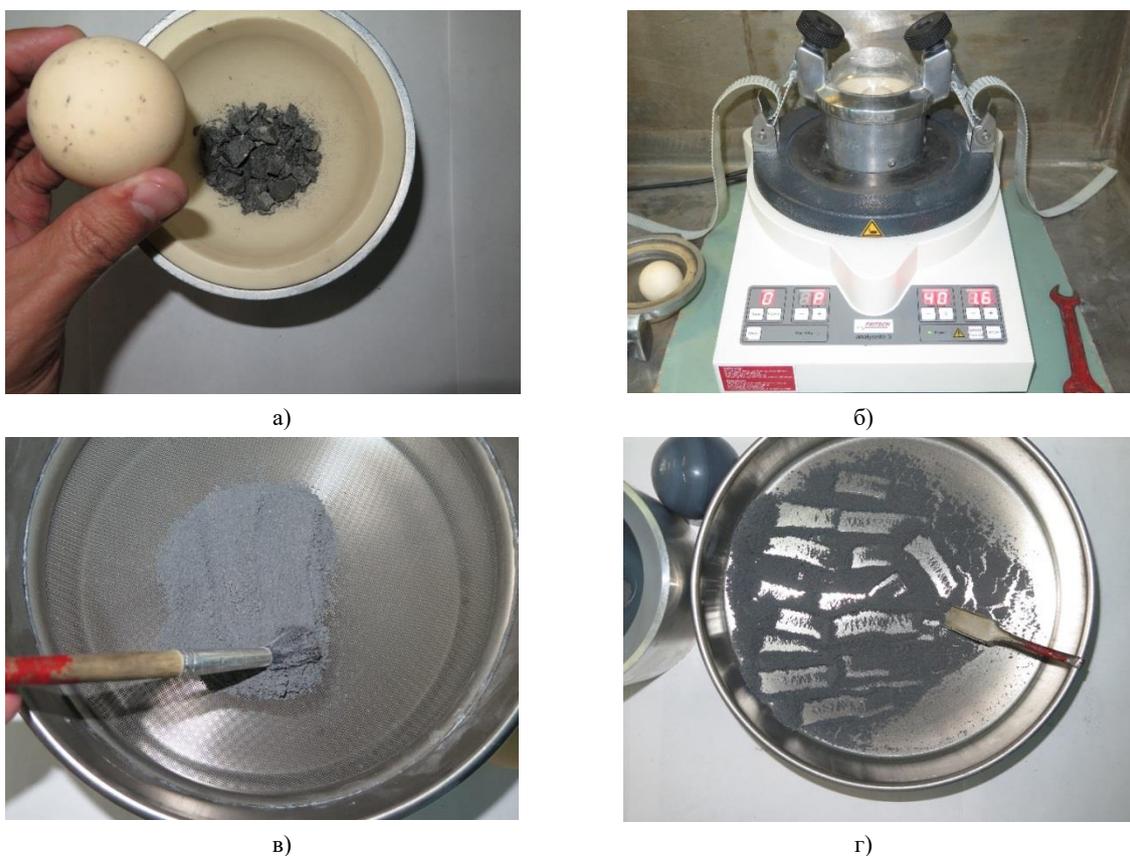


Рисунок 2. Процедуры подготовки проб бетона: предварительное измельчение дисковых заготовок (а); автоматизированное измельчение в вибрационной мельнице (б); просеивание через сито с размером ячеек 400 мкм (в); отбор представительной пробы (г)

Также для экспериментов были подготовлены и расфасованы стандартные образцы (рисунок 3). Стандартные образцы необходимы для проведения «относительного метода», для получения количественных результатов по ИНАА:

- 1) стандартный образец СГД 2;
- 2) стандартный образец СГ-4.

СГД-2а – эссекситовое габбро – крупнозернистая порода габбровой структуры, частично измененная вторичными процессами.

СГ-4 – субщелочной гранит, принадлежит к гранитоидам, характеризуется высоко-калиевым и низко-кальциевым составом и соответствует разновидности переходной от субщелочной к щелочной.

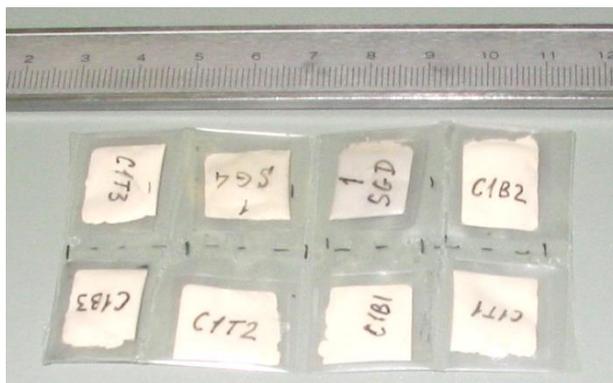


Рисунок 3. Запаянные и маркированные пакеты с образцами для эксперимента



Рисунок 4. Облучательный контейнер и образцы до облучения

Стандартные образцы, используемые в исследовании, не требуют специальной подготовки. Подготовка образцов заключалась в расфасовке и взвешивании образцов в соответствии с методическими указаниями по подготовке проб минерального сырья для инструментального нейтронно-активационного анализа [11].

Для эксперимента на реакторе был подготовлен и упакован в полиэтиленовые пакетики порошкообразный материал. Образцы С1В1...С1В3 подготовлены из нижней части бетонного керна М8-В. Образцы

С1Т1...С1Т3 подготовлены из верхней части бетонного керна М8-В. Кроме образцов бетона подготовлены 2 стандартных образца типа СГД и СГ-4. На рисунке 3 представлены образцы бетона М8В и стандартные образцы, подготовленные для размещения в контейнере для реакторного эксперимента.

Далее все образцы были размещены внутри экспериментального устройства (ЭУ), которое представляло собой цилиндр из алюминиевого сплава (рисунок 4). ЭУ с образцами устанавливалось в экспериментальный канал реактора, при этом образцы во время облучения находились в месте, соответствующем максимальной плотности потока нейтронов. Дополнительно ЭУ было оснащено термопарой для теплометрирования крышки во время облучения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И СПЕКТРОМЕТРИЯ

Облучение ЭУ с образцами проведено при мощности реактора 300 кВт и длительностью 8000 сек (рисунок 5).



Рисунок 5. Загрузка ЭУ с образцами в реактор для эксперимента

После облучения, через сутки (24 часа), проведены первые гамма-спектрометрические измерения образцов (рисунок 6), с помощью двух полупроводниковых детекторов из особо чистого германия с разрешением по линии ^{60}Co 1332 кэВ менее 1,8 кэВ.

На основе практического опыта по проведению инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) горных пород в лаборатории разработана методика для определения элементного состава минерального сырья [12].

Согласно методике, гамма-спектрометрические измерения каждого образца, включая стандартные образцы, проходили в три этапа:

- 1) *Время выдержки образцов 1 сутки.* После реакторного облучения для определения содержания таких элементов, как (Ga), Mn, Na и К анализируемые образцы выдерживают в течение 1 суток.

2) *Время выдержки образцов от 5 до 10 суток.* После реакторного облучения для определения содержания таких элементов, как Ba, Ca, La, Lu, Na, Nd, Rb, Sm, U, W, Yb, образец рекомендуется выдерживать в течение периода времени от 5 до 10 сут. За это время на 2–3 порядка падает активность основного мешающего радионуклида ^{24}Na .

3) *Время выдержки образцов от 25 до 30 суток.* После реакторного облучения для определения таких элементов, как Eu, Ce, Co, Cr, Cs, Fe, Hf, Sc, Sr, Ta, Tb, Th, Zn, Zr, образец рекомендуется выдерживать в течение периода времени от 25 суток. За это время на 2–3 порядка падает активность радионуклидов с периодом полураспада до 3 суток, в том числе ^{140}La , который вносит значительный вклад в радиационный фон от облученного образца.



Рисунок 6. Гамма-спектрометрические измерения образцов

Гамма-спектрометрические измерения стандартных и аналитических образцов проводились в одних и тех же условиях (стандартные и аналитические образцы устанавливаются на одной высоте над детектором). Таким образом, идентичность условий соблюдается не только в отношении геометрии (формы и массы) образцов, условий размещения в экспериментальном канале реактора и соответственно условий облучения стандартных и аналитических образцов, но и в ходе гамма-спектрометрических измерений. Это являлось важным и неотъемлемым условием проведения ИНАА с использованием стандартных образцов.

ПОРЯДОК РАСЧЕТА КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ И АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Концентрация элемента-аналита в анализируемом образце определялась в соответствии с основным уравнением (1) [13]:

$$C_a = C_{st} \left(\frac{N/t_c}{K_d K_c W} \right)_a / \left(\frac{N/t_c}{K_d K_c W} \right)_{st} \quad (1)$$

где символы a и st относятся к элементу-аналиту в образце и в стандарте соответственно; C_a , C_{st} – концентрации элемента-аналита в образце и в стандарте

соответственно, %; N – площадь пика полного поглощения (ППП), имп.; t_c – время экспозиции («живое» время измерения), с; K_d – поправка, учитывающая распад радиоактивного изотопа элемента-аналита за время «охлаждения» t_d , отн. ед.; K_c – поправка, учитывающая распад радиоактивного изотопа элемента-аналита за время измерения (счета) образца, отн. ед.; W – масса образца (стандарта), г;

Следующим шагом исследования было проведение анализа погрешностей определения концентрации аналита. Расчёт относительной погрешности определения концентрации аналита в образце $\delta(C_a)$ проводится в соответствии с [13–18]. Основными принципами методики расчёта погрешности являются:

1) Полная погрешность результата измерений определяется как сумма случайной и систематической погрешностей, приведённых к одинаковой доверительной вероятности $p = 0,95$;

2) Нормальный закон распределения составляющих случайной погрешности результата;

3) Равномерный закон распределения составляющих систематической погрешности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Особенности определения элементов Cs, Eu, Sm, Ta, Tb

Основной интерес при проведении ИНАА представляют элементы, продукты активации которых могут вносить значимый вклад в радиационную обстановку в помещениях при эксплуатации ИТЭР (в первую очередь, Cs, Eu, Sm, Ta, Tb). В этой связи ниже показаны некоторые детали определения концентрации этих элементов.

Для набора и анализа гамма-спектров использовали программное обеспечение *GENIE 2000*.

Цезий. Для определения цезия использовалась линия гамма-излучения 795,8 кэВ радиоактивного изотопа цезия ^{134}Cs . Линия – синглет, помехи при анализе отсутствуют. Предел определения цезия для бетона М8В составил 0,07 мг/кг. На рисунке 7 показан пример определения параметров пика с энергией 796 кэВ в окне программы IPF.

Европий. Для определения европия использовались линии 121,8 и 1408 кэВ. Линия 1408 является синглетом (рисунок 8-а). Линия 121,8 интерферирует с линией ^{154}Eu 123,1 кэВ и линией ^{131}Ba 123,8 кэВ (рисунок 8-б). Предел определения европия составил 0,014 мг/кг для линии 1408 кэВ и 0,006 мг/кг для линии 122 кэВ.

Самарий. Для определения самария ^{153}Sm использовалась линия с энергией 69,7 кэВ. Линию 103,2 кэВ ^{153}Sm (рисунок 9-б) использовать затруднительно, поскольку наблюдается интерференция с линией 103,7 кэВ ^{239}Np . Возможная помеха – присутствие в пробе тяжелых делящихся ядер, в первую очередь ^{235}U . Предел определения для бетона М8В составил 0,04 мг/кг.

Тантал. Для определения тантала использовалась линия 1221,4 кэВ радиоактивного изотопа тантала ^{182}Ta . На рисунке 10 показан пример определения параметров пика с энергией 1221 кэВ в окне программы IPF. Предел определения тантала для бетона М8В составил 0,04 мг/кг.

Тербий. Для определения тербия использовалась линия 298,6 кэВ радиоактивного изотопа тербия ^{160}Tb . На рисунке 11 показан пример разделения дуплета – двух интерферирующих линий 298,6 кэВ (^{160}Tb) и 300,1 кэВ (^{233}Pa) в окне программы IPF.

Присутствие в образцах ^{235}U является возможной помехой при определении не только Sm, но и таких элементов, как Ce, Nd, Zr и в меньшей степени – La. Так при определении Zr, вклад осколочного (образующегося при делении) ^{95}Zr может составить до

90% при содержании в образце урана 0,06 мг/кг, а циркония 0,003 мг/кг.

В таблице 2 представлены результаты определения содержания элементов-аналитов для трех образцов из нижней части бетонного керна М8В (образцы С1В1...С1В3) а также абсолютная погрешность определения концентрации элемента-аналитов в образце.

В таблице 3 приведены аналогичные результаты определения содержания элементов-аналитов для трех образцов из верхней части керна (образцы С1Т1...С1Т3).

На рисунке 8 в виде диаграммы представлены результаты определения содержания элементов-аналитов для образцов из нижней и верхней части бетонного керна М8В.

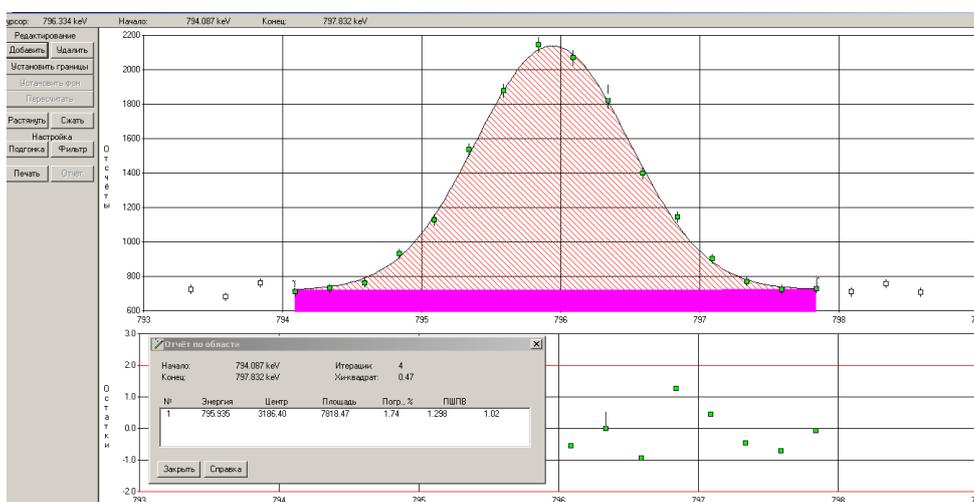


Рисунок 7. Линия 796 кэВ (^{134}Cs) в окне IPF

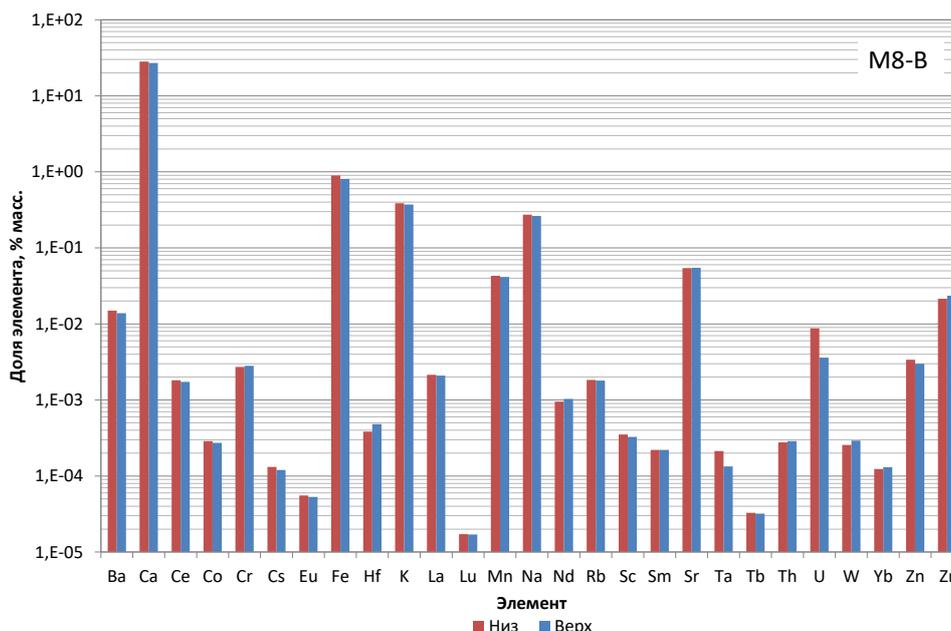


Рисунок 8. Результаты определения содержания элементов-аналитов

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В ОБРАЗЦАХ БЕТОНА ИТЭР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНАА
НА РЕАКТОРЕ ИВГ.1М**

Таблица 2. Результаты ИНАА образцов нижней части бетонного керна М8В, % масс.

Элемент	С1В1		С1В2		С1В3		Абсолютная ошибка
	GC1518-1	GC1518-2	GC1518-1	GC1518-2	GC1518-1	GC1518-2	
Ba	0,015	0,015	0,015	0,014	0,015	0,016	±0,004
Ca	28,1	27,2	29,0	28,4	28,8	28,0	±1,2
Ce	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0019	0,0018	±0,0004
Co	0,000286	0,00028	0,000298	0,00030	0,000286	0,00028	±0,00003
Cr	0,00277	0,0027	0,00283	0,0028	0,00260	0,0026	±0,0003
Cs	0,00013	0,00013	0,00013	0,00013	0,00013	0,00014	±0,00002
Eu	0,000053	0,000055	0,000055	0,000057	0,000055	0,000057	±0,000009
Fe	0,872	0,877	0,917	0,920	0,893	0,904	±0,02
Hf	0,00038	0,00038	0,00038	0,00039	0,00039	0,00038	±0,00009
K	0,392	0,40	0,373	0,39	0,382	0,38	±0,025
La	0,00208	0,00211	0,00213	0,00218	0,00215	0,00220	±0,00025
Lu	0,000017	0,000017	0,000017	0,000017	0,000017	0,000018	±0,000003
Mn	0,042	0,042	0,044	0,043	0,042	0,045	±0,004
Na	0,27	0,27	0,28	0,28	0,27	0,27	±0,01
Nd	0,0009	0,0010	0,0009	0,0010	0,0009	0,0010	±0,0003
Rb	0,0018	0,0018	0,0019	0,0018	0,0018	0,0019	±0,0003
Sc	0,000344	0,000344	0,000359	0,000361	0,000351	0,000353	±0,00004
Sm	0,00022	0,00021	0,00022	0,00021	0,00023	0,00023	±0,000035
Sr	0,0542	0,053	0,0542	0,054	0,0549	0,055	±0,0050
Ta	0,00013	0,00013	0,00019	0,00019	0,00030	0,00034	±0,00003
Tb	0,000033	0,000033	0,000033	0,000033	0,000032	0,000033	±0,000004
Th	0,00028	0,00027	0,00028	0,00027	0,00028	0,00028	±0,00004
U	0,0085	0,0086	0,0087	0,0087	0,0091	0,0091	±0,0008
W	0,00025	0,00025	0,00025	0,00025	0,00027	0,00027	±0,00009
Yb	0,00012	0,000123	0,00012	0,000130	0,00012	0,000130	±0,00002
Zn	0,0034	0,0033	0,0035	0,0034	0,0034	0,0033	±0,0002
Zr	0,021	0,022	0,021	0,022	0,021	0,022	±0,006

Таблица 3. Результаты ИНАА образцов верхней части бетонного керна М8В, % масс.

Элемент	С1Т1		С1Т2		С1Т3		Абсолютная ошибка
	GC1518-1	GC1518-2	GC1518-1	GC1518-2	GC1518-1	GC1518-2	
Ba	0,015	0,015	0,014	0,013	0,012	0,014	±0,004
Ca	26,9	27,3	26,7	27,4	27,2	26,9	±1,2
Ce	0,0017	0,0017	0,0018	0,0018	0,0017	0,0017	±0,0004
Co	0,000268	0,00027	0,000280	0,00027	0,000280	0,00027	±0,00003
Cr	0,00276	0,0027	0,00296	0,0029	0,00280	0,0028	±0,0003
Cs	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	±0,00002
Eu	0,000053	0,000054	0,000053	0,000054	0,000052	0,000053	±0,000009
Fe	0,800	0,799	0,814	0,800	0,804	0,803	±0,02
Hf	0,00048	0,00048	0,00049	0,00049	0,00047	0,00048	±0,00009
K	0,380	0,370	0,365	0,370	0,366	0,380	±0,025
La	0,00205	0,00206	0,00213	0,00214	0,00208	0,00206	±0,00025
Lu	0,000017	0,000017	0,000017	0,000018	0,000017	0,000016	±0,000003
Mn	0,042	0,041	0,041	0,041	0,042	0,042	±0,004
Na	0,26	0,26	0,26	0,27	0,26	0,27	±0,01
Nd	0,0010	0,0011	0,0010	0,0010	0,0010	0,0011	±0,0003
Rb	0,0018	0,0019	0,0018	0,0018	0,0017	0,0018	±0,0003
Sc	0,000325	0,000325	0,000331	0,000328	0,000328	0,000326	±0,00004
Sm	0,00023	0,00022	0,00023	0,00022	0,00022	0,0002	±0,000035
Sr	0,056	0,056	0,054	0,053	0,055	0,054	±0,0050
Ta	0,00015	0,00015	0,00015	0,00015	0,0001	0,0001	±0,00003
Tb	0,000032	0,000033	0,000032	0,000033	0,000031	0,000031	±0,000004
Th	0,00029	0,00028	0,00031	0,00030	0,00028	0,00027	±0,00004
U	0,0030	0,0031	0,0042	0,0043	0,0035	0,0035	±0,0008
W	0,00031	0,00032	0,00031	0,00030	0,00025	0,00026	±0,00009
Yb	0,00012	0,000136	0,00013	0,000140	0,00012	0,000138	±0,00002
Zn	0,0031	0,0029	0,0031	0,0029	0,0031	0,0029	±0,0002
Zr	0,023	0,025	0,023	0,023	0,023	0,024	±0,006

На основании данных таблиц 2 и 3 определено содержание элементов в бетоне М8В и погрешности: Cs – 1,3 ($\pm 0,2$) мг/кг, Eu – 0,54 ($\pm 0,09$) мг/кг, Sm – 2,2 ($\pm 0,35$) мг/кг, Ta – 1,7 ($\pm 0,3$) мг/кг, Tb – 0,32 ($\pm 0,04$) мг/кг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен инструментальный нейтронно-активационный анализ образцов, приготовленных из керна бетона М8В, облучения образцов происходило в исследовательском реакторе ИВГ.1М при флюенсе тепловых нейтронов $5,3 \cdot 10^{16}$ н/см², гамма-спектрометрические измерения проводились при различной выдержки образцов от одних суток до одного месяца. Проведена обработка результатов гамма-спектрометрических измерений. Рассчитаны концентрации основных и примесных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фронтасьева М.В. Нейтронно-активационный анализ в науках о жизни // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2011. – Т. 42. – С. 636–701.
2. Kaytipuly C.J., Westland A.D. Review of methods for the determination of lanthanides in geological samples // Talanta. – 1988. – Т. 35, № 1. – Р. 1–13.
3. Таблица определения химических элементов методом нейтронно-активационного анализа // Изв. АН Каз.ССР. Сер. физ. и техн. наук. – 1980. – № 6. – С. 3–7.
4. Нургалиева Д.Ж., Омарова Н.М., Фронтасьева М.В., Моржухина С.В. Атмосферное выпадение тяжелых металлов на территории Республики Казахстан // ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ЧТЕНИЯ – 2018 Международная научно-практическая конференция, 2018. – С. 219–223.
5. I. Yu. Silachyov. Determination of rare earths in uranium raw material by neutron activation analysis and X-ray fluorescence // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan-Series Chemistry and Technology. – 2018 – V 3, № 429, P. 28–38.
6. Rajmund S. Dybczyński. The role of NAA in securing the accuracy of analytical results in the inorganic trace analysis // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2019, Vol 322, Issue 3, PP. 1505–1515.
7. Wael M., Badawy Khaled Ali, Hussein M, El-Samman, Marina V. Frontasyeva, Svetlana F. Gundorina, Octavian G. Dului. Instrumental neutron activation analysis of soil and sediment samples from Siwa Oasis, Egypt // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2015, Vol 12, Issue 4, pp. 637–644.
8. Робертус Юрий Владимирович, Рихванов Леонид Петрович, Ситникова Валентина Александровна, Савенко Ксения Сергеевна, Большунова Татьяна Сергеевна Элементный состав лишайника на шифере как биоиндикатор загрязнения атмосферы агломерации г. Горно-Алтайска // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018, Т 329. – №4. – С. 70–78
9. Данилова Е.А., Хайдарова М.М., Шамсиев Ф.М., Киста.А., Осинская Н.С. Оценка эффективности витаминно-минерального комплекса «Лайфпак юниор» методом нейтронно-активационного анализа в лечении детей с заболеваниями органов дыхания // Медицинская физика. – 2009, Т 42. – №:4. – С. 53–56.
10. Былкин Борис Константинович, Енговатов Игорь Анатольевич, Кожевников Алексей Николаевич, Синюшин Дмитрий Константинович. Банк данных по активационным характеристикам бетонов радиационной защиты ядерных установок // Вестник МГСУ. – 2018. – Т 13. – Выпуск 2(113). – С. 213–221.
11. Методические указания по подготовке проб минерального сырья для инструментального нейтронно-активационного анализа: инструкция / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК; разработчик отдел 240.– Курчатова, 25.12.2012.– 10 с.– Инв. № К-50993.
12. Методика проведения нейтронно-активационного анализа проб минерального сырья с использованием исследовательских реакторов ИВГ.1М и ИГР / Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК.– Курчатова, 13.01.2015.– 12 с.– № К-52121.
13. R. Jacimovic. Comparison of relative INAA and k 0-INAA using soil and sediment reference materials. J Radioanal. Nucl. Chem. – 2014. – Vol. 300. – P. 663–672
14. А. Кузнецов. Активационный анализ. Изд. 2-е. М., Атомиздат, 1974, с. 344.
15. Practical aspects of operating a neutron activation analysis laboratory. IAEA-TECDOC-564. 1990 г.
16. Брискман Б.А., Генералов В.В., Крамер-Агеев Е.А., Трошин В.С. Внутрореакторная дозиметрия. Практическое руководство. М. Энергоиздат. 1985.
17. Метрология нейтронных измерений на ядерно-физических установках. Материалы I Всесоюзной школы. Том 1 и 2. Под редакцией Васильева Р.Д. М., 1976. с 176.
18. Тустановский В.Т. Оценка точности и чувствительности активационного анализа. М.: Атомиздат. 1976, с. 192.

Сравнение данных инструментального нейтронно-активационного анализа с аттестованными содержаниями элементов в стандартных образцах показывает их совпадение в пределах стандартного отклонения практически для всех определяемых элементов. Это подтверждает высокую точность полученных результатов к примесям образцов бетона и правильность применения методики ИНАА.

Результаты определения элементного состава верхней и нижней частей блока М8В совпадают с точностью до погрешности определения.

В бетоне марки М8В определено содержание элементов, которые могут вносить основной вклад в радиационную обстановку в помещениях при эксплуатации и декомиссии ИТЭР.

**ИВГ.1М РЕАКТОРЫНДА ИНАТ-ДЫ ПАЙДАЛАНЫП БЕТОН
ҮЛГІЛЕРІНДЕГІ ҚОСПАЛАРДЫ АНЫҚТАУ**

Б.С. Медетбеков, Ю.А. Попов, И.В. Прозорова

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

Бұл жұмыс ITER реакторының конструкциялық материалы – бетон сынамаларындағы қоспаларды анықтауға арналған. Реакторлық эксперименттер мен спектрометриялық зерттеулердің нәтижелері келтірілген. Инструменталды нейтрондық активациялық талдауды жүзеге асыру үшін үлгілер ИВГ.1М реакторында сәулелендірілді. Пост-талдауға салыстырмалы ИНАТ әдісімен негізгі және қоспалық элементтердің концентрациясын есептей отырып, ұсталым уақыты бір тәуліктен бір айға дейінгі әр түрлі үлгілердің әсер ету уақыттарымен гамма-спектрометриялық өлшеулер жүргізілді. Салыстыру үшін стандартты үлгілер ретінде SG-4 және SGD сияқты тау жыныстарынан тұратын стандартты материалдар пайдаланылды. ИВГ.1М реакторында инструменталды нейтрондық активациялық талдау барысында қателіктерге талдау жасалды. Жүргізілген ИНАТ зерттеулер нәтижесінде ИТЭР-ді пайдалану және тоқтату кезінде үй-жайлардағы радиациялық жағдайға негізгі үлес қоса алатын элементтер анықталды.

**DETERMINATION OF IMPURITIES IN ITER CONCRETE SAMPLES
USING INAA AT IVG.1M REACTOR**

B.S. Medetbekov, Yu.A. Popov, I.V. Prozorova

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

This work is devoted to the determination of impurities in concrete samples – the structural material of the ITER reactor. The results of reactor experiments and spectrometric studies are presented. Irradiation of samples for instrumental neutron activation analysis was carried out at the IVG.1M reactor. Post-analysis included gamma spectrometric measurements with different exposure times of samples from one day to one month, with the calculation of the concentration of the main and impurity elements by the relative INAA method. For comparison, rocks such as SG-4 and SGD were used as standard materials. An analysis of errors was performed during instrumental neutron activation analysis at the IVG.1M reactor. As a result of the research, the content of elements that can make the main contribution to the radiation situation in the premises during the operation and decommissioning of ITER are determined.

УДК 538.9

ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЙ СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СПЛАВОВ Hf-C

¹⁾ Тулеушев Ю.Ж., ¹⁾ Жақанбаев Е.А., ¹⁾ Орақова М.С., ¹⁾ Керімше А.С., ¹⁾ Мамырбаев А.Қ., ²⁾ Сарсенбаева К.Б.¹⁾ *Институт ядерной физики МЭ РК, Алматы, Казахстан*²⁾ *Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

В работе проведены исследования по синтезу покрытий на основе гафния и углерода, с использованием методики ионно-плазменного напыления покрытий из чередующихся слоев гафния и углерода с толщиной каждого слоя менее 1 нм. При выполнении работ нами была использована четырехканальная магнетронная установка с двумя оппозитно расположенными магнетронами. Один магнетрон заряжен мишенью из гафния, а второй магнетрон заряжен углеродной мишенью. Определена скорость и оптимальные режимы распыления гафния и углерода. Получены зависимости количества распыленного гафния и углерода от приложенной к магнетрону мощности. Определена средняя мощность распыления гафния, которая по выносу вещества соответствует выносу углерода при его максимально возможной мощности распыления. Проведен синтез покрытий гафний-углерод в диапазоне концентраций от 59,8 до 5,3 ат.% углерода и выполнены рентгенографические исследования покрытий карбидов. Определено, что в покрытиях гафний-углерод, сформированных методом магнетронного осаждения, при концентрациях от 59,8 до 26,1 ат.% углерода происходит формирование кубической фазы карбида гафния, с уменьшением параметра решетки. При концентрации 16,2 ат.% углерода наряду с кубической фазой карбида гафния в покрытии начинает выделяться гафний с гексагональной структурой. При дальнейшем уменьшении концентрации углерода в покрытии гексагональная фаза гафния становится преобладающей.

Ключевые слова: ионно-плазменный синтез, рентгеноструктурный анализ, магнетронный распылитель, вакуумная система, наноразмерное легирование, азотирование, скорость распыления.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время развитие аэрокосмической отрасли и потребность во все более высокотемпературных турбинах обусловили поиск новых материалов с высокой температурой плавления [1–5]. В 2015 году появилась работа [6], в которой, используя расчеты электронной структуры, проведено исследование системы Hf-Ta-C, которая включает в себя соединения, имеющие самые высокие точки плавления из известных на сегодняшний день. В этой работе были выделены основные химические факторы, которые способствуют высокой температуре плавления. На основании этих факторов был предложен класс материалов, которые могут обладать еще более высокими температурами плавления, а с помощью эффективных расчетов молекулярной динамики определен состав максимизации точки плавления. Было получено, что покрытие из карбида-нитрида гафния с составом 53 ат.% Hf, 27 ат.% C и 20 ат.% N должно обладать температурой плавления около 4500 К.

Применение таких покрытий в турбиностроении позволит повысить рабочую температуру и, тем самым, к.п.д. при выработке электроэнергии [7–8]. Использование покрытий из карбонитрида гафния в космической технике для защиты поверхности ракетного сопла от прогара может позволить поднять температуру и скорость истечения рабочих газов из сопла и, тем самым, увеличить массу поднимаемых на орбиту грузов. Кроме того, покрытия со сверхвысокой температурой плавления необходимы для защиты поверхности гиперзвуковых летательных аппаратов [9]. Таким образом, разработка технологии получения сверхвысокотемпературных покрытий позво-

лит Республике Казахстан встать на лидирующие позиции в таких важных отраслях, как аэрокосмическая техника и турбиностроение.

При разработке технологии получения наноматериалов на основе сплавов гафния с углеродом будет использована методика ионно-плазменного напыления покрытий из чередующихся слоев гафния и углерода с толщиной каждого слоя менее 1 нм. Данное обстоятельство позволяет использовать принципиально новый технологический прием – наноразмерное легирование [10] – с целью получения не существовавшего ранее материала. Ионно-плазменная технология получения покрытий отличается высокой устойчивостью при воспроизведении технологических результатов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

При выполнении работ нами была использована четырехканальная магнетронная установка с двумя оппозитно расположенными магнетронами. Один магнетрон заряжен мишенью из гафния, а второй магнетрон заряжен углеродной мишенью и будет задействован при дальнейших исследованиях. При определении скорости распыления углерода мишень гафния будет закрыта шторкой.

Скорость распыления металлов определяется как количество распыленного металла, распыленного в единицу времени, приходящегося на единицу мощности, поданной на магнетрон. Мощность при распылении выбирается в зависимости от типа распыляемой мишени, но в виду технологических характеристик магнетронного устройства максимальная мощность распыления углерода в среде аргона или аргоно-азотной смеси заметно ниже чем у металлов. В связи

с этим перед нами стояла задача определения границ распыления по минимальной и максимальной мощности, при которых будет стабильно гореть магнетронный разряд в атмосфере чистого аргона и аргон-азотной смеси. Время распыления мишени определяется по требуемой толщине покрытия, но при этом следует учитывать запас вещества в распыляемой мишени, в нашем случае формирование каждого из покрытий производилось в течении одного часа.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Определение режимов совместного осаждения покрытий гафний углерод. Скорость распыления металлов определяется как количество распыленного металла, распыленного в единицу времени и приходящегося на единицу мощности, поданной на магнетрон. Мощность при распылении выбирается в зависимости от типа распыляемой мишени, но в виду технологических характеристик магнетронного устройства максимальная мощность распыления углерода в среде аргона или аргон-азотной смеси заметно ниже чем у металлов. В связи с этим перед нами стояла задача определения границ распыления по минимальной и максимальной мощности, при которых будет стабильно гореть магнетронный разряд в атмосфере чистого аргона и аргон-азотной смеси. Время распыления мишени определяется по требуемой толщине покрытия, но при этом следует учитывать запас вещества в распыляемой мишени, в нашем случае формирование каждого из покрытий производилось в течении одного часа.

Определение скорости распыления гафния

Проведено рентгеноструктурное исследование мишени для определения исходной структуры гафния, по его результатам мишень имеет гексагональ-

ную решетку гафния с параметрами $a=3,19635 \text{ \AA}$ и $c=5,05107 \text{ \AA}$, которая практически совпадает с табличным параметром решетки гафния в соответствии с карточкой COD №1539076 (рисунок 1).

Мощность при распылении выбирается в зависимости от типа распыляемой мишени, но в виду технологических характеристик магнетронного устройства максимальная мощность распыления гафния в среде аргона или аргон-азотной смеси заметно выше, чем у углерода. В связи с этим перед нами стояла задача определения границ распыления гафния по минимальной и средней мощности, при которых будет происходить распыление мишени. Время распыления гафния определялось по требуемой толщине покрытия, и при этом учитывалась низкая скорость распыления углерода. Поэтому необходимости определения максимальной мощности, подаваемой на магнетрон в случае распыления гафния, не было.

В результате нами была определена средняя мощность распыления гафния, которая по выносу вещества соответствовала бы выносу углерода при максимально возможной мощности. В результате максимально возможная мощность магнетрона с гафнием, при которой будет происходить равноценное по выносу распыление с углеродом, составила 40 Вт.

Исходя из этих соображений в календарном плане проекта на второй квартал была поставлена задача определения скорости распыления гафния, по мощности на магнетроне и времени. Для этого были проведены контрольные распыления гафния в атмосфере аргона в диапазоне мощностей от 5 до 100 Вт. На рисунке 2 приведен полученный график зависимости количества распыленного гафния от приложенной к магнетрону мощности.

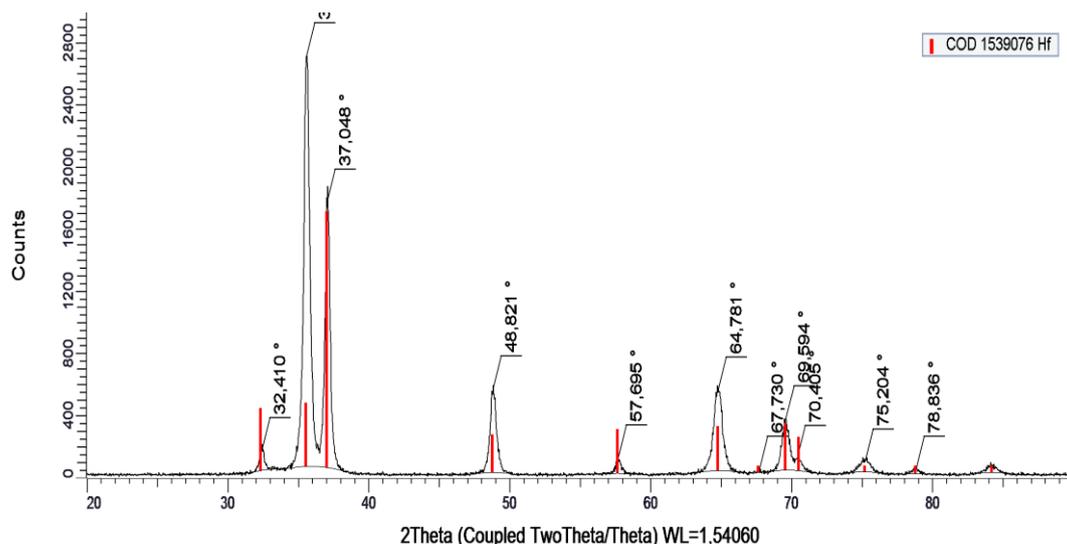


Рисунок 1. Дифрактограмма мишени гафния

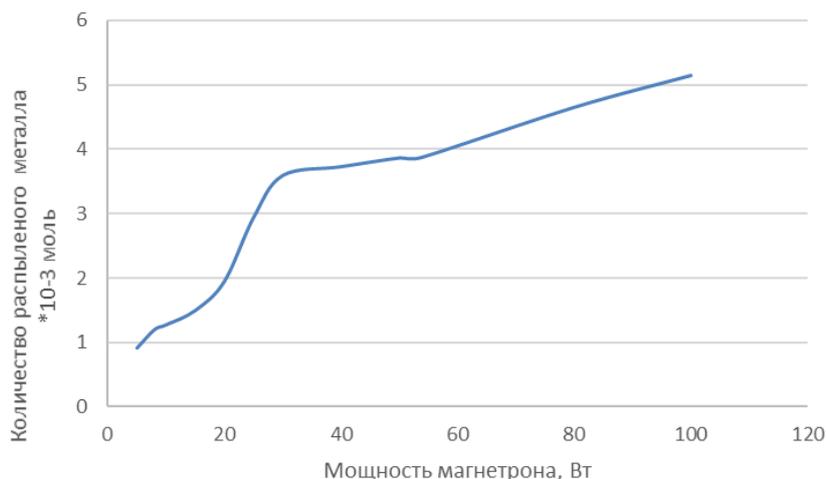


Рисунок 2. Изменение количества распыленного гафния в зависимости от мощности на магнетроне

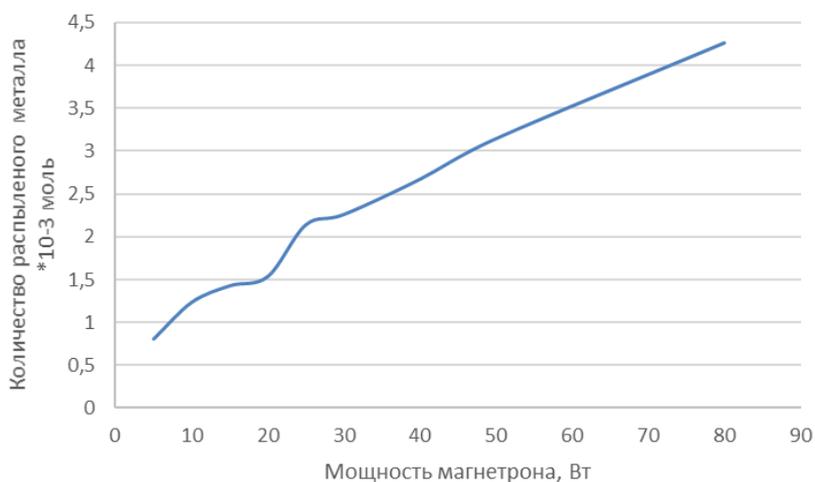


Рисунок 3. Изменение количества распыленного гафния в зависимости от мощности на магнетроне в аргон-азотной атмосфере

Так как общая задача исследования – формирование покрытий на основе карбонитридов, то нам необходимо было провести исследование скорости распыления гафния в аргон-азотной атмосфере, при этом состав реакционного газа состоял из 22 об. % азота и 78 об. % аргона. В результате нами были получены данные о скорости распыления гафния в аргон-азотной атмосфере при мощностях, подаваемых на магнетронное устройство, равным 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 и 80 Вт. Соответственно при мощности 5 Вт вынос вещества с поверхности мишени составил $0,812 \cdot 10^{-3}$ моль, при мощности 10 Вт составил $1,24 \cdot 10^{-3}$ моль, при мощности 15 Вт составил $1,432 \cdot 10^{-3}$ моль при 20 Вт – $1,54 \cdot 10^{-3}$ моль, 25 Вт – $2,143 \cdot 10^{-3}$ моль, 30 Вт – $2,264 \cdot 10^{-3}$ моль, 40 Вт – $2,674 \cdot 10^{-3}$ моль, 50 Вт – $3,148 \cdot 10^{-3}$ моль и при мощности 80 Вт вынос углерода с поверхности составил $4,264 \cdot 10^{-3}$ моль (рисунок 3).

Установлено, что при распылении гафния в аргон-азотной атмосфере, происходит уменьшение ко-

личества распыленного металла. Это можно объяснить тем, что в процессе осаждения поверхность мишени покрывается пленкой нитрида гафния, возникшей при взаимодействии плазмы с аргон-азотной средой. По мере проведения процесса распыления нитридная пленка несколько снижает скорость распыления гафния. В связи с низкой скоростью распыления углерода, для дальнейшего получения сплавов гафний-углерод будут использованы малые мощности распыления гафния – до 40 Вт, чтобы скорость распыления гафния соответствовала скорости распыления углерода.

Определение скорости распыления углерода

Была определена максимальная мощность, при которой идет стабильное распыление углерода (увеличение предельной мощности приводит к срыву плазменного факела в магнетроне), которая составила 50 Вт, при этом напряжение, подаваемое на магнетрон, составило 750 В при токе 66,7 мА.

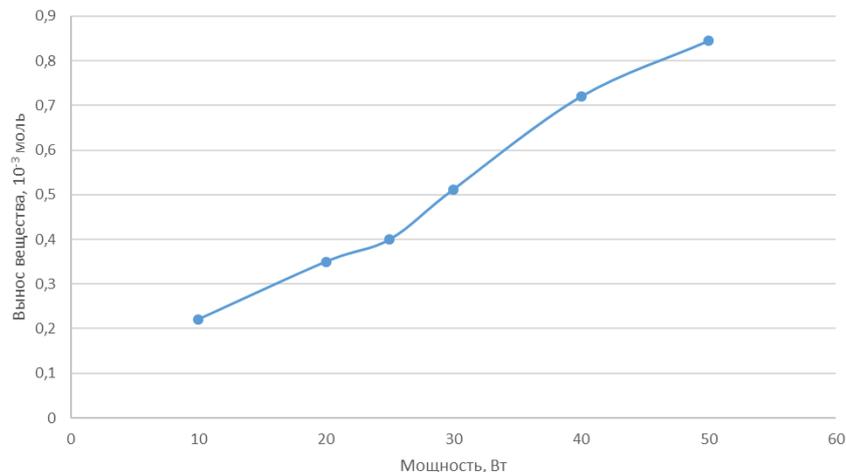


Рисунок 4. Изменение скорости распыления углерода в зависимости от мощности на магнетроне

После осаждения углерода при мощности 50 Вт в течении одного часа вынос вещества с поверхности мишени составил $0,845 \cdot 10^{-3}$ моль. Минимальная мощность, подаваемая на магнетрон при которой наблюдается стабильный разряд плазмы составила 10 Вт, при напряжении 490 В и токе 10,2 мА. За один час распыления углерода при этой мощности вынос вещества с мишени составил $0,221 \cdot 10^{-3}$ моль. Далее было произведено осаждение углерода при мощности 25 Вт, напряжение, подаваемое на магнетронное устройство, составляло 600 В при токе 40,5 мА – при данной мощности вынос вещества с поверхности мишени составил $0,4 \cdot 10^{-3}$ моль. Также нами были получены данные о выносе вещества с поверхности мишени при мощности 20, 30 и 40 Вт при этом вынос вещества с мишени составил соответственно 0,35, 0,512 и $0,72 \cdot 10^{-3}$ моль. На основании этих данных нами была построена зависимость количества распыленного углерода от приложенной к магнетронному устройству мощности (рисунок 4).

Так как общая задача исследования – формирование покрытий на основе карбонитридов, необходимо было провести исследование скорости распыления углерода в аргон-азотной атмосфере, при этом состав реакционного газа состоял из 22 об. % азота и 78 об. % аргона. В результате были получены данные о скорости распыления углерода в аргон-азотной атмосфере при мощностях, подаваемых на магнетронное устройство, равных 10, 20, 25, 30, 40 и 50 Вт. Соответственно при мощности 10 Вт вынос вещества с поверхности мишени составил $0,12 \cdot 10^{-3}$ моль, при мощности 20 Вт – $0,25 \cdot 10^{-3}$ моль, 25 Вт – $0,311 \cdot 10^{-3}$ моль, 30 Вт – $0,4 \cdot 10^{-3}$ моль, 40 Вт – $0,57 \cdot 10^{-3}$ моль и при 50 Вт вынос углерода с поверхности составил $0,74 \cdot 10^{-3}$ моль (рисунок 5).

Обе зависимости показывают, что распыление углерода в атмосфере аргона и аргон-азотной смеси имеют линейный характер – с ростом мощности растет и вынос вещества с поверхности углеродной ми-

шени. Уменьшение выноса мишени при распылении в аргон-азотной смеси связано с тем, что наличие в инертной среде азота приводит к частичному азотированию поверхности мишени, которое препятствует выносу вещества с поверхности мишени.

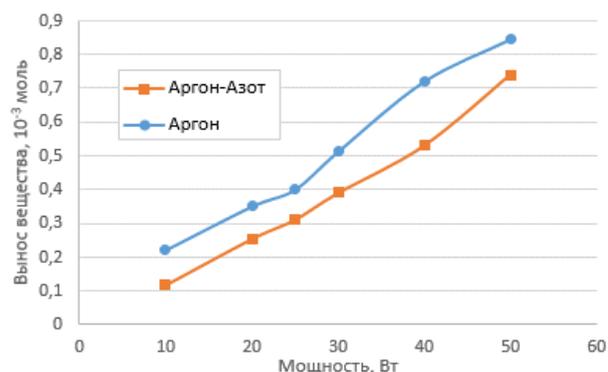


Рисунок 5. Изменение скорости распыления углерода в зависимости от мощности на магнетроне

Исследование структуры покрытий системы гафний-углерод

Были выполнены рентгенографические исследования покрытий карбидов и нитридов гафния. В ходе проведенных работ синтезированы и исследованы покрытия гафний-углерод в диапазоне концентраций от 59,8 до 5,3 ат.% углерода.

В результате проведенных исследований было определено что в системе гафний-углерод сформированных методом магнетронного осаждения, при концентрациях от 59,8 до 26,1 ат.% углерода в покрытии происходит формирование кубической фазы карбида гафния, с уменьшением параметра решетки. При концентрации 16,2 ат.% углерода, наряду с кубической фазой карбида гафния в покрытии начинает выделяться гафний с гексагональной структурой. При дальнейшем уменьшении концентрации углерода в покрытии гексагональная фаза гафния становится преобладающей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены зависимости количества распыленного углерода как для атмосферы аргона, так и для аргон-азотной смеси. Обе зависимости показывают, что распыление углерода в атмосфере аргона и аргон-азотной смеси имеют линейный характер, с ростом мощности растет и вынос вещества с поверхности углеродной мишени. Установлено, что уменьшение выноса мишени при распылении в аргон-азотной смеси связано с тем, что присутствие в инертной среде азота приводит к частичному азотированию поверхности мишени, которое препятствует выносу вещества с поверхности мишени.

Определена скорость распыления гафния и оптимальные режимы распыления. Выявлены границы распыления гафния по минимальной и средней мощности, при которых будет происходить распыление мишени. Определена средняя мощность распыления гафния, которая по выносу вещества соответствует

выносу углерода при максимально возможной мощности. Установлено, что максимальная мощность магнетрона с гафнием, при которой будет происходить равноценное по выносу распыление с углеродом, составила 40 Вт. Проведены контрольные распыления гафния в атмосфере аргона в диапазоне мощностей от 5 до 100 Вт.

Получены зависимости количества распыленного гафния от приложенной к магнетрону мощности, которые в дальнейшей работе позволят точно регулировать соотношение компонент при формировании бинарной системы гафний-углерод как для распыления в среде аргона, так и для аргон-азотной среды.

Получены покрытия системы гафний-углерод в диапазоне концентраций углерода от 59,8 до 5,3 ат.%. Проведены рентгеноструктурные исследования полученных покрытий и проведен анализ полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Padture N. P., Gell M., Jordan E. H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications // Science. – 2002. – Vol. 29. – P. 280.
2. Perepezko J. H. The hotter the engine, the better // Science. – 2009. – Vol. 326. – P. 1068.
3. Lu K. The future of metals // Science. – 2010. – Vol. 328. – P. 319.
4. Liu G., Zhang G. J., Jiang F., Ding X. D., Sun Y. J., Sun J., Ma E. Nanostructured high-strength molybdenum alloys with unprecedented tensile ductility // Nat. Mater. – 2013. – Vol. 12. – P. 344.
5. Wuchina E., Opila E., Opeka M., Fahrenheit W., Talmy I. UHTCs: Ultra-high temperature ceramic materials for extreme environment applications // Electrochem. Soc. Interface. – 2007. – Vol. 16. – P. 30.
6. Hong Q. J. Prediction of the material with highest known melting point from ab initio molecular dynamics calculations // Physical Review B. – 2015. – Vol. 92. 020104(R).
7. Marino K. A., Hinnemann B., Carter E. A. Atomic-scale insight and design principles for turbine engine thermal barrier coatings from theory // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS). – 2011. – Vol. 108. – №14. – P. 5480-5487.
8. Padture N. P., Gell M., Jordan E. H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications // Science. – 2002. – Vol. 296. – P. 280-284.
9. Nieto A., Kuma A., Lahiri D., Zhang Ch., Seal S., Agarwal A. Oxidation behavior of graphene nanoplatelet reinforced tantalum carbide composites in high temperature plasma flow // Carbon. – 2014. – Vol. 67. – P. 398-408.
10. Тулеушев А. Ж., Тулеушев Ю. Ж., Володин В. Н. Наноразмерное легирование в металлических пленках // Физика металлов и металловедение. – 2004. – Т. 97. – № 4. – С. 49-57.

ИОНДЫҚ ПЛАЗМАЛЫҚ СИНТЕЗ, Hf-C ҚОРЫТПАЛАРЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫ МЕН ҚАСИЕТТЕРІ

¹⁾ Ю.Ж. Тулеушев, ¹⁾ Е.А. Жаканбаев, ¹⁾ М.С. Оракова, ¹⁾ А.С. Керімше, ¹⁾ А.Қ. Мамырбаев, ²⁾ К.Б. Сарсенбаева

¹⁾ ҚР ЭМ ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

²⁾ Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

Бұл жұмыста гафний мен көміртектің негізінде қабаттардың синтезі бойынша зерттеулер жүргізілді, әр қабаттың қалыңдығы 1 нм-ден кем гафний мен көміртектің ауыспалы қабаттарынан жабындыларды ионды-плазмалық бүрку әдісі қолданылды. Жұмысты орындау кезінде біз төрт арналы магнетронды қондырғыны қолдандық. Онда карама-қарсы орналасқан екі магнетрон қолданылды. Бір магнетронға гафний нысаны, ал екінші магнетронға көміртек нысаны зарядталған. Гафний мен көміртектің шашырау жылдамдығы мен оңтайлы режимдері анықталды. Магнетронға түсірілген қуатқа атомдалған гафний мен көміртек мөлшерінің тәуелділігі алынады. Гафнийдің орташа атомдану қуаты анықталды, ол көміртектің максималды атомизациялау қабілетімен алып тастаумен затты кетіруге сәйкес келеді. Концентрациясы 59,8% -ден 5,3% -ке дейін. Көміртегі құрамындағы гафний-көміртекті жабындардың синтезі жүргізіліп, карбидті жабындыларға рентгендік зерттеулер жүргізілді. Магнетронды тұндыру арқылы түзілген гафний-көміртек жүйесінде 59,8% -ден 26,1% -ге дейінгі концентрацияда анықталады. Қаптамада көміртегі, тор параметрінің төмендеуімен гафний карбидінің кубтық фазасы түзіледі. 16,2% концентрациясында көміртегі, гафний карбидінің куб фазасымен бірге, гегний құрылымында алты қырлы

қабатта тұнба бастайды. Қабаттағы көміртегі концентрациясының одан әрі төмендеуімен алты қырлы гафний фазасы басым болады.

Түйін сөздер: иондық-плазма синтезі, рентгендік дифракция анализі, магнетронды тозаңдатқыш, вакуумдық жүйе, наноөлшемді легірілеу, азоттау, шашырау жылдамдығы.

ION-PLASMA SYNTHESIS, STRUCTURE AND PROPERTIES OF Hf-C ALLOYS

¹⁾ Yu.Z. Tuleushev, ¹⁾ E.A. Zhakanbaev, ¹⁾ M.S. Orakova, ¹⁾ A.S. Kerimshe, ¹⁾ A.K. Mamyrbayev, ²⁾ K.B. Sarsenbayeva

¹⁾ *Institute of Nuclear Physics Ministry of Energy RK, Almaty, Kazakhstan*

²⁾ *Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

In this work, studies have been carried out on the synthesis of coatings based on hafnium and carbon, using the method of ion-plasma spraying of coatings from alternating layers of hafnium and carbon with a thickness of each layer less than 1 nm. When performing the work, we used a four-channel magnetron setup. In which two oppositely located magnetrons were used. One magnetron is charged with a hafnium target, and the other magnetron is charged with a carbon target. The rate and optimal modes of sputtering of hafnium and carbon have been determined. The dependences of the amount of atomized hafnium and carbon on the power applied to the magnetron are obtained. The average atomization power of hafnium has been determined, which corresponds to the removal of the substance with the removal of carbon at its maximum possible atomization power. The synthesis of hafnium-carbon coatings in the concentration range from 59.8 to 5.3 at.%. Carbon was carried out, and X-ray studies of carbide coatings were performed.

Determined in the hafnium-carbon system formed by magnetron deposition, at concentrations from 59.8 to 26.1 at. % carbon in the coating, the cubic phase of hafnium carbide is formed, with a decrease in the lattice parameter. At a concentration of 16.2 at. % carbon, along with the cubic phase of hafnium carbide, hafnium with a hexagonal structure begins to precipitate in the coating. With a further decrease in the carbon concentration in the coating, the hexagonal phase of hafnium becomes predominant.

Keywords: ion-plasma synthesis, X-ray structural analysis, magnetron sputter, vacuum system, nanoscale doping, nitriding, sputtering rate.

УДК 550.34.01

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ И СЕЙСМИЧНОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАЗАХСТАНА

¹⁾ Абетов А.Е., ²⁾ Узбеков А.Н.¹⁾ *Казахский Национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан*²⁾ *РГП «Институт геофизических исследований» МЭ РК, Курчатов, Казахстан*

В статье дается характеристика использованных материалов; излагаются вопросы аппаратного обеспечения и методики составления карт аномального геомагнитного, гравитационного и тепловых полей и результаты интерпретации по полученным данным, исследуются вопросы увязки наблюдаемых геомагнитных, гравитационного и тепловых полей по отдельным разрозненным участкам. Также рассматриваются главные закономерности распределения аномального геомагнитного поля (ΔT_a) в пределах Центрального Казахстана, затрагиваются вопросы природы аномального магнитного поля отдельных районов, некоторых крупных геологических структур, аномальных полей и аномалий. Анализируются результаты исследований по выявлению корреляционных связей между аномальным геомагнитным, гравитационным и тепловым полем и сейсмичностью на территории Центрального Казахстана.

Ключевые слова: аномальное геомагнитное поле, методики составления карт, гравитационное поле, тепловое поле, корреляционные связи, сейсмичность Центрального Казахстана.

ВВЕДЕНИЕ

Историю проведения геомагнитной съемки на территории Центрального Казахстана можно условно разделить на несколько этапов.

Первые магнитные съемки магнитометрами Тиберга-Талена (М-1) проведены Д.Н. Редкиным в 1932 г. на участках Каражал (Устанынжал), Большой и Малый Ктай, где к тому времени были известны обнажения железных руд [1].

В 1934–1936 гг. в Центральном Казахстане выполнялась магнитная съемка Атасуйскими геофизическими партиями Казгеологуправления. В процессе последующего анализа и обобщения материалов по результатам площадных съемок аномального геомагнитного поля выявлен ряд скрытых интрузивных и субвулканических тел, разломов различных направлений и масштабов, перекрытых осадочными отложениями верхнедевонского и нижнекаменноугольного возрастов, погребенных горстов и грабенов различного порядка и других элементов тектоники [1].

Аэромагнитные исследования на территории Центрального Казахстана проводились в разных масштабах и различными организациями при решении региональных геологических задач в помощь геолого-съёмочным работам и поискам различных полезных ископаемых.

В результате этих работ были получены сведения об общей структуре магнитного поля Центрального Казахстана и открыт ряд железорудных месторождений на общей площади около 750 тыс. кв. км.

С 1950 года региональные (масштаба 1:1 000 000–1:500 000) и с 1951 года регионально-поисковые (масштаба 1:200 000–1:100 000) аэромагнитные съемки в Центральном Казахстане проводились с феррозондовыми аэромагнитометрами АЭМ-49 Всесоюзным научно-исследовательским институтом разведочной геофизики [1].

К концу 50-х годов среднемасштабными регионально-поисковыми аэромагнитными съемками с феррозондовыми аэромагнитометрами была заснята практически вся территория Центрального Казахстана. Материалы этих работ явились основой при составлении, подготовке к изданию полистных карт аномального геомагнитного поля Казахстана масштаба 1:200 000 и 1:1 000 000. Однако вследствие того, что эти съемки выполнялись в большинстве случаев с визуальной привязкой по устаревшим топокартам масштаба 1:200 000, точность результирующих карт признана невысокой.

В 1962–1966 гг. Казахским геофизическим трестом, КазВИРГом и Волковской экспедицией в Центральном Казахстане выполнялись крупномасштабные аэромагнитные съемки с фотопривязкой маршрутов с более современными феррозондовыми аэромагнитометрами АМФ-21 (станции АСГ-45, АСГ-46, АСГ-48, АСГ-48-М2 и АМ-13), что позволило повысить точность этих съемок (± 15 – 25 нТл). Для фотопривязки стали применяться широкоугольные аэрофотоаппараты и развиваться сети каркасных маршрутов [2].

В 1961 г. Казахским геофизическим трестом опробована радиогеодезическая привязка маршрутов, что позволило с 1963 г. перейти к аэромагнитным съемкам масштаба 1:10 000 с повышенными требованиями к точности привязки маршрутов (± 25 м) и точности активного вождения самолета (± 30 м). Точность этих съемок возросла до ± 10 – 20 нТл.

В целом, разномасштабные аэромагнитные съемки в Центральном Казахстане за период 1955–1966 гг. имеют перекрытия как между собой, так и по каждому отдельно взятому участку. Иначе говоря, крупномасштабными съемками в большинстве случаев перекрыты площади мелко- и среднемасштабных съемок, проведенных в предыдущие годы с фер-

розондовыми аэромагнитометрами первых поколений [2].

В 1966–1968 гг. Казахским геофизическим трестом (В.Н. Григорьев) был проведен критический анализ материалов, выполненных в Казахстане (в т.ч. по Центральному Казахстану) аэромагнитных съемок по состоянию на 01.01.1967 года.

В результате этих работ были составлены картограммы аэромагнитной изученности по масштабам и технико-экономическим показателям аэроработ, проведено сравнение результатов аэромагнитных съемок различных типов между собой и с наземными съемками. Рассмотрены вопросы методики интерпретации аэромагнитных данных. На основании указанных материалов проведено отнесение аэромагнитных съемок к определенному масштабу исследований.

В 1965–1968 гг. в Казахском геофизическом тресте была составлена и подготовлена к изданию сводная карта изодинам аномального магнитного поля Казахстана масштаба 1:1 500 000 (М.В. Куминова, А.М. Шурунова, В.М. Сердюкова, Л.М. Крухмалева, А.Е. Васнецова) под общей редакцией М.Д. Морозова.

Эта сводная карта явилась первой обзорной картой аномального магнитного поля территории Казахстана, отражающей различные элементы его геологического строения. В дальнейшем она широко использовалась при планировании региональных и поисковых геолого-геофизических работ, при выполнении различных тематических исследований, составлении сводных карт различного геологического содержания: металлогенических, тектонических, магматических формаций и т.п.

Крупномасштабные аэромагнитные съемки с феррозондовыми аэромагнитометрами последних поколений в помощь геолого-съёмочным и поисковым работам продолжились до 1978 года. С 1964 г. они выполнялись параллельно с дискретными измерениями величины полного вектора геомагнитного поля. Это позволило привести относительные измерения к абсолютным значениям магнитного поля Земли.

В 1978 году КазИМСом (Н.Я. Екидина) были выполнены работы по оценке качества завершающихся в Казахстане (по Центральному Казахстану) аэромагнитных исследований с феррозондовыми аэромагнитометрами и начавшихся на качественно новом уровне съемок с протонными и квантовыми аэромагнитометрами. В результате работ в масштабах 1:500 000 и 1:3 000 000 составлены картограммы аэромагнитной изученности за этот период, на которых те или иные отчетные карты отнесены к определенному масштабу по кондиционности [3].

Кроме поисково-съёмочных работ материалы крупномасштабных аэромагнитных съемок использовались при продолжавшемся составлении, подго-

товке к изданию и изданию комплектов полистных карт аномального магнитного поля масштаба 1:200 000 в графиках и изолиниях, а также масштаба 1:1 000 000 в изолиниях.

В 1974 г. под научной редакцией З.А. Макаровой была издана сводная карта аномального геомагнитного поля территории Казахстана масштабов 1:1 000 000–1:200 000, а в 1978 г. ею была опубликована пояснительная записка к этой карте, которая явилась завершающим этапом многолетнего труда картосоставительских партий по составлению и подготовке к изданию комплектов магнитных карт масштаба 1:200 000 и 1:1 000 000 [3].

В 2004 г. была издана карта аномального магнитного поля (ΔT_a) Казахстана масштаба 1:1 000 000 под редакцией Б.С. Ужкенова и др. [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В поле региональных геомагнитных аномалий (ΔT_a) территории Центрального Казахстана преимущественно отражаются неоднородно намагниченные горные породы консолидированной земной коры, залегающие на разных глубинах.

Дифференцированность горных пород по степени намагниченности, их физической структуре, глубинам залегания определяют морфологию аномального геомагнитного поля Центрального Казахстана, в структуре которого преимущественно отражаются неоднородно намагниченные горные породы консолидированной земной коры, залегающие на разных глубинах.

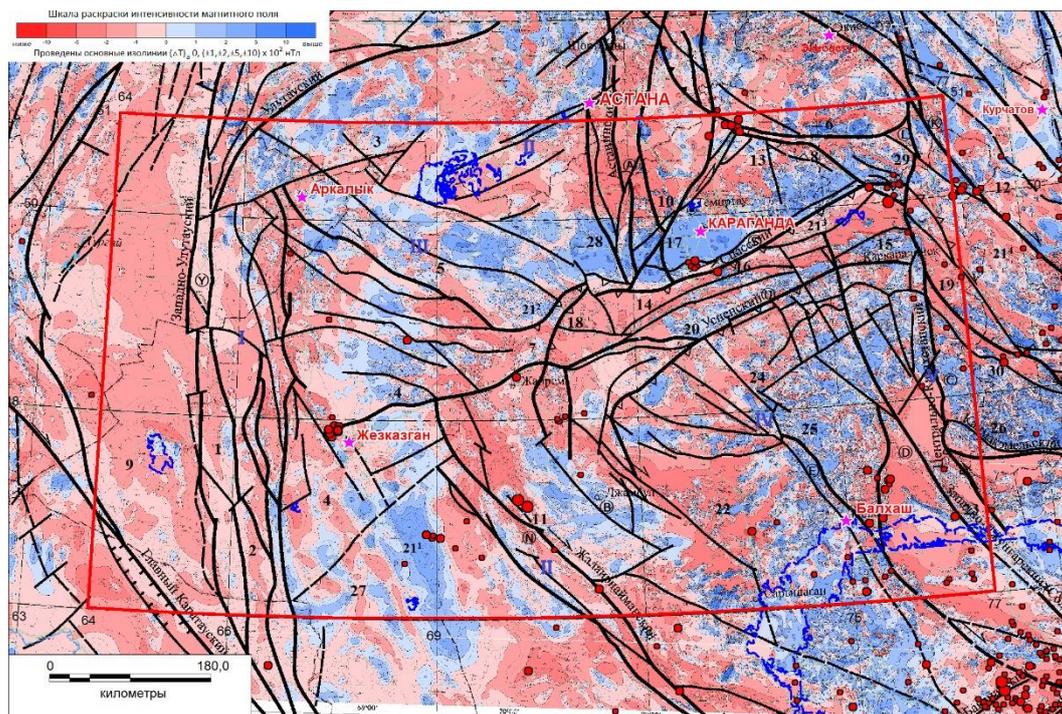
Осадочный чехол, будучи практически немагнитным или слабомагнитным, не изменяет картины поля, создаваемой погруженными частями палеозойских структур.

В аномальном геомагнитном поле Центрального Казахстана (выделяемого в границах одноименного щита) наблюдаются самые различные по морфологии геомагнитные аномалии: линейно-вытянутые и дугообразные, извилистые с четко выраженным преобладанием большей оси, чередующиеся с субизометричными, кольцевыми, мозаичными и сложными по конфигурации в плане аномалиями (рисунок 1).

Напряженность геомагнитного поля здесь также испытывает резкие вариации. Встречаются крупные и небольшие по размерам, интенсивные и малоинтенсивные аномалии, с низким и высоким градиентом изменения значений напряженности.

Линейные аномальные зоны

Образуют протяженные линейно-вытянутые или дугообразные аномалии. Однако нередки случаи, когда в составе этих зон выделяются изометричные и полигональной формы аномалии ΔT_a с повышенными или пониженными значениями, располагающимися цепочками, кулисообразно или четковидно и ориентированные в определенном направлении [5].



I – Выступы метаморфического фундамента: 1–2 – Улутауский; **II – Каледонские складчатые зоны:** *Антиклинории:* 6 – Ерментауский, 8 – Боцекульский, 12 – Чингизский мегантиклинорий, 27 – Бетпақдалинский, 28 – Майкаинский; *Синклинории:* 9 – Байқонурский, 10 – Селетинский, 11 – Жалаир-Найманский, 29 – Баянаульский; **III – Наложённые герцинские структуры в каледонидах:** 3 – Тенизская впадина, 4 – Джекзказганская (Чу-Джекзказганская) впадина, 5 – Сарысу-Тенизская зона глыбовых складок, 7 – Каражальский прогиб, 13 – Шидертинская впадина, 17 – Карагандинский прогиб, 21¹ – 21² – 21³ – 21⁴ – девонский краевой вулканический пояс; **IV – Герцинская Джунгаро-Балхашская система:** *Антиклинории:* 14 – Спасский, 16 – Тектурмасский, 18 – Атасуйский, 22 – Актау-Моинтинский, 23 – Северо-Балхашский; *Синклинории:* 15 – Нуринский, 19 – Карасорский, 20 – Успенский (с одноименной зоной смятия), 24 – Жаман-Сарысуйский; **V – Балхаш-Илийский позднепалеозойский вулканический пояс:** *Впадины:* 25 – Токрауская, 26 – Калмакэмельская, 30 – Баканасская; *Глубинные разломы:* (А) – Астанинский, (Б) – Западно-Балхашский, (С) – Центрально-Казахстанский, (Д) – Западно-Джунгарский, (Е) – Коунрад-Борлинский, (К) – Калба-Чингизский, (Л) – Чингизский надвиг, (N) – Жалаир-Найманский, (С) – Спасский, (У) – Успенский, (У) – Западно-Улутауский.
 ● – очаги землетрясений, — — — тектонические разломы, — — — исследуемый контур, 1–30 – тектонические элементы

Рисунок 1. Фрагмент карты аномального магнитного поля по Центральному Казахстану с элементами тектоники и сейсмичности

Этот тип аномалий приурочен к крупным по размерам антиклинальным структурам, глубинным разломам региона исследований.

Наибольшая контрастность, выраженность или информативность аномалий ΔT_a наблюдается над выходами на дневную поверхность домезозойского фундамента, где в структуре аномального геомагнитного поля четко проявляются такие элементы геологического строения, как магматические образования среднего и основного состава, глубинные разломы, блоки осадочно-вулканогенных формаций, места проявления вторичных изменений горных пород, а также приуроченные к ним некоторые месторождения полезных ископаемых [6].

Примером контрастного отображения разрывной тектоники в положительном аномальном геомагнитном поле с напряженностью от +150 до +600 нТл и более (АГМП) Центрального Казахстана является меридиональный тектонический блок, содержащий интрузивы магнитных верхнекарбонных лейкогранитов и расположенный в юго-восточной его части

блок немагнитных осадочных пород. Приурочен он к фрагменту Центрально-Казахстанского разлома, трассирующегося в юго-восток северо-западном направлении (рисунок 1, С).

Довольно уверенно коррелируются с характерными понижениями АГМП Спасский надвиг (рисунок 1, С), северо-западные оконечности Чингизского надвига и Калба-Чингизский надвиг-сдвиг (рисунок 1, Л и К) а также Балхашский и Жалаир-Найманский разломы северо-западного направления, обособляющиеся резкими отрицательными линейными аномалиями ΔT_a [7].

В структурном элементе Жалаир-Найманской синклинория структурно-тектонической зоной, вдоль одноименного разлома наблюдаются очаги землетрясений, зафиксированные в интервале глубин 18–22 км по данным станций ИГИ МЭ РК.

Линейная аномальная зона магнитного поля Спасского антиклинория, приуроченного к одноименному разлому, ориентирована с севера-востока на юго-запад. Напряженность аномалий варьирует в

диапазоне $-50 \div -650$ нТл и более. Местами наблюдаются спорадически развитые линейные аномалии положительного знака ($+50 \div +600$ нТл и более). Простирание аномалий ΔT_a полностью согласуется с пространственным позиционированием Спасского антиклинория.

На отдельных площадях, расположенных в зоне сочленения последнего с Карагандинской впадиной наблюдаются очаги землетрясений, зафиксированные в интервале глубин 18–24 км.

В структурном элементе Улутаусского метаморфического выступа субмеридионального простирания и коррелирующиеся с ним аномалии ΔT_a генетически связаны с интрузиями основного-среднего состава и/или блоками ультрамафитов и эффузивов основного-среднего составов.

Отрицательные аномалии геомагнитного поля здесь ориентированы субмеридионально, с юго-востока на северо-запад. Напряженность этих аномалий изменяется в диапазоне $-50 \div -500$ нТл и более. Местами наблюдаются спорадически развитые линейные аномалии положительного знака ($+50 \div +600$ нТл).

Ориентация аномалий ΔT_a совпадает с простиранием Улутаусского метаморфического выступа. На отдельных площадях этого выступа, расположенных в зоне его сочленения с Джезказганской впадиной, наблюдаются очаги землетрясений, зафиксированные в интервале глубин 14–16 км.

В южной части девонского краевого вулканического пояса положительные аномалии геомагнитного поля ориентированы субмеридионально. Их интенсивность изменяется в широком диапазоне ($+50 \div +550$ нТл и более). Не наблюдается согласованность в простирании южной части девонского краевого вулканического пояса и обособляющихся здесь аномалий ΔT_a . Гипоцентры сейсмических событий зафиксированы в интервале глубин $h=1-15$ км.

Аномалии девонского краевого вулканического пояса ориентированы дугообразно. На южном фланге этого пояса наблюдается северо-западная их ориентация, на южном – северо-восточная. Простирание аномалий геомагнитного поля согласуется с простиранием девонского краевого вулканического пояса.

Напряженность отрицательных аномалий ΔT_a здесь варьирует в диапазоне $-50 \div -650$ нТл и более. Местами наблюдаются спорадически развитые линейные аномалии положительного знака ($+50 \div +550$ нТл и более).

На отдельных площадях наблюдаются очаги землетрясений, зафиксированные в интервале глубин 18–20 км. Сейсмичность в районе Центрального Казахстана обнаружена в последние десятилетия по данным сети станций Института геофизических исследований МЭ РК.

В северо-западной части девонского краевого вулканического пояса и Майкаинского антиклинория обособляются ареалы повышенных значений аномалий сложной, полигональной формы с напряженно-

стью до 600 нТл и более, чаще вытянутые в северо-западном и субширотном направлениях. Ориентация аномалий совпадает со структурными элементами девонского краевого вулканического пояса.

Генезис этих аномалий может быть связан с обнажающимися севернее скрытыми интрузивами основного-среднего состава и метасоматическими и метаморфическими изменениями.

На северо-востоке Карагандинской впадины, на фоне положительных вариаций АГМП ($+500 \div +600$ нТл), выделяются ареалы инверсии этого поля со значением аномалий геомагнитного поля до $-100 \div -300$ нТл. [1] (рисунок 1, зона III).

Обращает на себя особое внимание площади на севере Карагандинской впадины, где над немагнитными породами карбона и юры наблюдается повышение интенсивности АГМП до $+500$ нТл и более, интерпретируемое сравнительно неглубоким залегающим посткарбонных интрузивов, представителем которых могут быть выходы гранодиоритов в 60 км к северо-западу от п. Шахтинск.

На отдельных площадях, расположенных в зоне сочленения Карагандинской впадины, наблюдаются очаги землетрясений, зафиксированные в интервале глубин 14–22 км. Эти землетрясения также выявлены по данным станций ИГИ МЭ РК.

Изометричные и овальные аномалии

Изометричные, кольцевые и овальные аномалии различных размеров соответствуют штокам, батолитам интрузивных пород, жерлам вулканов и другим локальным геологическим образованиям.

Над этими телами наблюдаются локальные изометрические отрицательные аномалии интенсивностью от нескольких сотен до тысячи нТл на фоне индифферентного отрицательного или слабopоложительного магнитного поля [7].

В структурных элементах Бошекульского антиклинория и Шидертинской впадины аномальные геомагнитные поля с напряженностью от -200 до -650 нТл и более представлены локальными изометричными (в том числе кольцевыми) аномалиями ΔT_a приуроченными к закартированным штокам и массивам нижне-пермских сиенодиоритов (восточнее поселков Торгай, Еремтау, Аршалы), аляскитов (например у п. Кокдомбак и Баянаул), гранодиоритов (в 40 км к западу от ж.с. Акадыр).

В структурных элементах Тенизкой впадины и Сарысу-Тенизкой зоны глыбовых складок, сложенные палеозойскими образованиями, выделяются изометричными либо полигональными положительными аномалиями с напряженностью $+100$ и $+500$ нТл и более. Местами интенсивность аномалий здесь увеличивается до $+600 \div +700$ нТл, реже более.

Генезис аномалий ΔT_a связывается со штоками и массивами нижнепермских сиенодиоритов. Простирание аномалий или аномальных зон можно группировать на северо-восточное, северо-западное и мери-

диональное направления, не согласующиеся с общей ориентацией Тенизкой впадины и Сарысу-Тенизской зоны глыбовых складок.

В структурном элементе Успенского антиклинория в АГМП представляет собой относительно узкую зону субширотной ориентации с напряженностью аномалий $+100 \div +550$ нТл и более. Наблюдается совпадение структурного плана данного антиклинория и обособляющихся здесь аномалий. Успенский антиклинорий в АГМП представляет собой зону субширотной ориентации с напряженностью аномалий $-200 \div -600$ и $+100 \div +550$ нТл. Выделяется совпадением простирающихся магнитных аномалий и тектонических элементов.

Мозаичные системы аномалий знакопеременного геомагнитного поля

Образуются в основном мелкими изометричными и неправильными по форме аномальными областями и участками, представляющие совокупность хаотически расположенных положительных и отрицательных аномалий различной интенсивности [7].

Сложный характер АГМП практически не меняется в Северо-Балхашском антиклинорий. Интенсивные геомагнитные аномалии переменных значений (от $-200 \div -500$ нТл до $+500$ нТл и более) знаков образуют здесь сложной конфигурации в плане аномальные поля, которые связываются с интрузивами Северо-Балхашского (Коунрадского) и Саякского рудных районов.

К востоку и северо-востоку от Центрально-Казахстанского и Чингизского тектонических разрывов в аномальном геомагнитном поле обособляется область резко дифференцированных («пестрых») аномалии с четкой тенденцией к северо-западному простираю. Вся эта территория по магнитным данным может быть отнесена уже к Иртышско-Алтайскому складчатому поясу.

В аномальном геомагнитном поле Джекказганской впадины представляется возможным проследить четко выраженное смыкание (и частично глубинное продолжение) крупных геологических структур Казахстана. В её северо-западной части закартированы выходы кристаллического фундамента Улутау (Карсакпая); в юго-западной части - северное окончание Большого Каратау; а северо-восточнее и восточнее отмечаются сегменты Атасуской, Чу-Илийской и Жалаир-Найманской зон складчатости [7].

В аномальном геомагнитном поле центральной части этой впадины наблюдается четко выраженная аномалия ΔT_a , вытянутая в северо-западном направлении и состоящая из трех максимумов в $+200 \div +400$ нТл (в 20 км к юго-западу от городов Жезказган и Сатбаев). Эта аномалия вероятно, вызвана скрытым (неэродированным) интрузивом основ-

ного-среднего составов, сыгравшим важную роль в метаморфогенных процессах.

На отдельных площадях, приуроченных к зонам разломов и расположенных в зоне сочленения Джекказганской впадины с Улутауским метаморфическим выступом в интервале глубин 14–16 км зафиксированы очаги землетрясений.

Джунгаро-Балхашская область обособляется сложным характером АГМП с интенсивностью аномалий обеих знаков от $-200 \div -500$ до $+50 \div +400$ нТл и более. Простирающиеся этих аномалий здесь слабо коррелируются с ориентацией тектонических элементов. В зонах разломов этой области зарегистрированы очаги землетрясений глубиной 15–22 км по данным станций ИГИ МЭ РК.

Гравитационное поле

В поле региональной составляющей гравитационных аномалий обособляются три крупных литосферных блока, ограниченные зонами высокоградиентных ступеней:

а) Центрально-Казахстанский гравитационный минимум (от -105 до -270 мгл);

б) область переменных значений аномалий гравитационного поля (от $+15$ до -70 мгл), приуроченная к зонам каледонской складчатости и частично к наложенным герцинским структурам в каледонидах;

в) Улутауский относительный гравитационный максимум ($+25 \div +40$ мгл);

С поверхности этим блокам отвечают разнородные геологические структуры: блоки докембрийских пород, ранние и поздние каледониды, ранние и поздние герциниды верхнепалеозойские вулканоплутонический пояса (рисунок 2).

На ранних стадиях изучения Центрального Казахстана генезис гравитационных аномалий увязывался с прогибом поверхности Мохо, проявлением позднепалеозойского орогенеза, удвоением мощности земной коры при масштабных надвигах и др. Концепциями [8].

На более поздних стадиях изучения – доминируют представления о прямых связях характера распределения гравитационных аномалий с процессами палеозойского внутриконтинентального рифтогенеза, что подтверждается присутствием здесь региональных разуплотненных объектов в верхней мантии, пространственно совпадающих с зонами пониженных скоростей, низких электрических сопротивлений и повышенных тепловых параметров.

Формированием региональных разуплотненных объектов в верхней мантии увязывается, по видимому, с подъемом мантийного вещества и внедрением его в земную кору. Эти процессы сопровождалась потоками восстановленного мантийного флюида, раскрытием рифтовых зон, изолиниями базальтов повышенной щелочности [8].

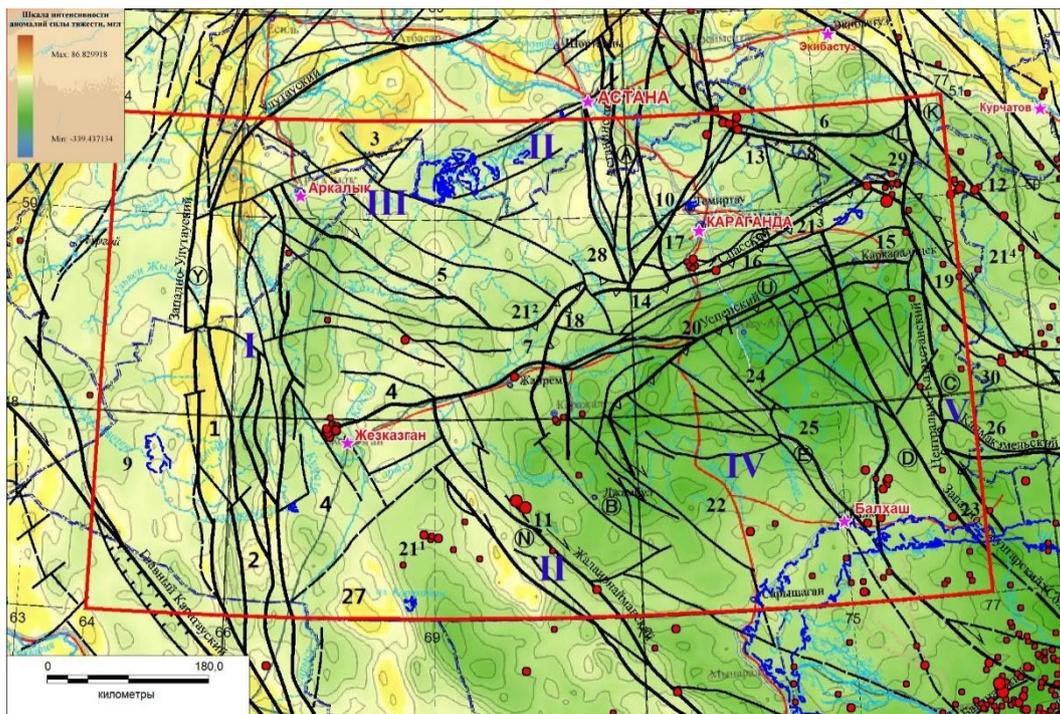


Рисунок 2. Схема региональной составляющей поля силы тяжести, совмещенная с очагами землетрясений [8]

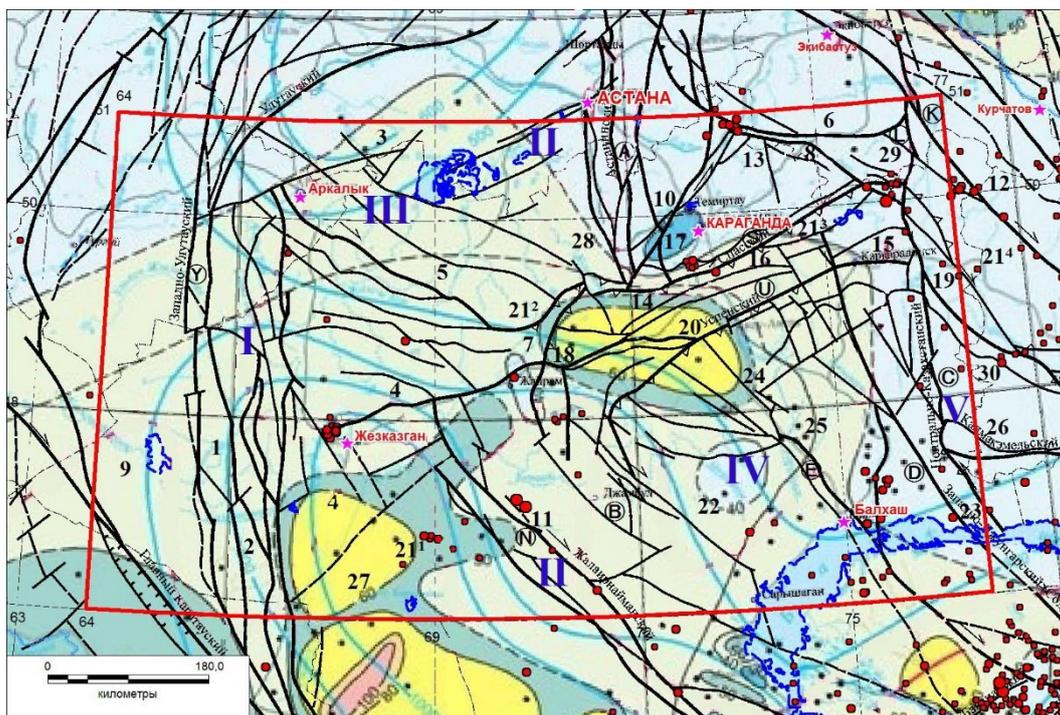


Рисунок 3. Схема теплового потока и активных разломов на территории Центрального Казахстана [9]

Тепловое поле

На срезе консолидированной коры 30 км наблюдается тренд увеличения значений геотермических аномалий в западном направлении, что коррелируется с возможным изменением теплопроводности пород консолидированной коры (рисунок 3).

Областям с увеличенными значениями геотермических аномалий присущи линейно - вытянутые геомагнитного поля обоих знаков и субмеридиональной ориентации, тогда как районам с пониженными значениями геотермических аномалий на срезах консолидированной коры 10 и 30 км – мозаичные, овальные и кольцевые аномалии [9].

Областям с минимальными значениями температур в консолидированной коре отвечает широкий диапазон изменения аномалий и знака геомагнитного поля. Здесь оно не стабильно и вариабельно.

Областям с минимальными значениями температур отвечает широкий интервал изменений значения гравитационного поля, тогда как в направлении областей с увеличенными значениями температур интервал изменений значений аномалий силы тяжести сокращается.

По периферии Центрально-Казахстанского гравитационного минимума и на стыке областей с разным возрастом консолидации фундамента концентрируются очаги землетрясения. Большая часть сейсмических очагов сосредоточена в градиентных зонах изменений значений геотермических, геомагнитных и плотностных аномалий консолидированной коры [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании вышеизложенного, представляется возможным сформулировать следующие выводы:

Аномальное геомагнитное поле Центрального Казахстана (АГМП) обусловлено неоднородно намагниченными горными породами, залегающими на разной глубине в консолидированной земной коре.

Высокая дифференцированность АГМП отражает геологическую структуру Казахского щита и, в целом, индицирует генетические и тектоно-магматические аспекты его геологического строения;

Морфология, напряженность и размеры геомагнитных аномалий предоставляют возможность проведения идентификации и геологического прогноза, тогда как форма, размеры, протяженность и дифференцированность этих аномалий, их градиентность характеризуют качественные (структурные) признаки магнитовозмущающих тел.

На территории Казахского щита наблюдаются самые различные по своим параметрам магнитные аномалии: линейно-вытянутые и дугообразные, извилистые с четко выраженным преобладанием большей оси, полигональные, субизометрические, овальные, кольцевые, мозаичные и сложные по конфигурации в плане; интенсивные и малоинтенсивные; низко- и высокоградиентные (контрастные); наконец, крупные и весьма незначительные по площади.

АГМП Казахского щита отображает разную степень намагниченности горных пород, а также их относительное взаиморасположение, структуру и глубину залегания. Кроме того, через изменения магнитных свойств, вызванных контактово-метасоматическими, метаморфическими и гидротермальными процессами, аномалии этого поля до некоторой степени включают в себя последствия рудообразовательного, магматического и литологического последствий становления площадей.

Аномальное геомагнитное поле Центрального Казахстана коррелируется с сейсмической активностью

и современными движениями земной коры. Очаги землетрясений приурочены к глубинным разломам или узлам разломов, такие области характеризуются резкой сменой знаков напряженности и ориентации магнитных аномалий. Наибольшее количество сейсмических событий приурочено к разломам, разграничивающим тектонические блоки с разными по интенсивности и знаку аномалии геомагнитного поля. В поле региональной составляющей гравитационных аномалий обособляются три крупных литосферных блока, ограниченные зонами высокоградиентных ступеней: а) Центрально-Казахстанский гравитационный минимум (от -105 до -270 мгл); б) область переменных значений аномалий гравитационного поля (от $+15$ до -70 мгл), приуроченная к зонам каледонской складчатости и частично к наложенным герцинским структурам в каледонидах; в) Улугауский относительный гравитационный максимум (до $+25 \div +40$ мгл);

С поверхности этим блокам отвечают разнородные геологические структуры: блоки докембрийских пород, ранние и поздние каледониды, ранние и поздние герциниды верхнепалеозойские вулканоплутонический пояса.

На ранних стадиях изучения Центрального Казахстана генезис гравитационных аномалий увязывался с прогибом поверхности Мохо, проявлением позднепалеозойского орогенеза, удвоением мощности земной коры при масштабных надвигах и др. концепциями.

На более поздних стадиях изучения – доминируют представления о прямых связях характера распределения гравитационных аномалий с процессами палеозойского внутриконтинентального рифтогенеза, что подтверждается присутствием здесь региональных разуплотненных объектов в верхней мантии, пространственно совпадающих с зонами пониженных скоростей, низких электрических сопротивлений и повышенных тепловых параметров.

Формированием региональных разуплотненных объектов в верхней мантии увязывается, по-видимому, с подъемом мантийного вещества и внедрением его в земную кору. Эти процессы сопровождалась потоками восстановленного мантийного флюида, раскрытием рифтовых зон, излияниями базальтов повышенной щелочности.

Изменения характера аномалии геомагнитного поля. Контрастность и выразительность и значения аномального гравитационного поля. Здесь же установлены увеличенные значения тепловых потоков и значения аномалии тепловых полей.

Областям с минимальными значениями температур отвечает широкий диапазон изменения аномалии магнитного поля (магнитное поле не стабильно и вариабельно) равно, как интервал изменения значения гравитационного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белкин В.А., Миронченко Ю.А., Одинцов С.Д. Аномальное магнитное поле (АМП) на высотах 30 км// В сб.: Исследование структуры геомагнитного поля. – М.: ИЗМИРАН, 1983. – С. 178–184.
2. Бекжанов Г.Р. Основные этапы изучения глубинного строения и металлогении Казахстана. Алматы, 1997. – С. 8–19.
3. Карта аномального магнитного поля (ΔT_a) Казахстана. Масштаб 1:1 000 000. Объяснительная записка. – Алматы 2002. 120 с.
4. Глубинное строение и минеральные ресурсы Казахстана. / Даукеев С.Ж., Ужкенов Б.С., Любецкий В.Н., Мирошниченко Л.А., Воцалевский Э.С. и др. – Алматы, 2002. – Т.1 216с.
5. Луговенко В.Н. Статистический анализ аномального поля СССР. – М. Наука. 1974. 250 с.
6. Луговенко В.Н., Одинцов С.Д. К вопросу о пространственной структуре аномального магнитного поля континентов// В сб.: Экспериментальные исследования геомагнитного поля / Под ред. Луговенко В.Н. – М.:ИЗМИРАН, 1984. – С. 65–72.
7. Abetov A.E., Uzbekov A.N. Abnormal magnetic field of Central Kazakhstan // Геология и охрана недр. - Алматы. – С. 47–52.
8. Абетов А.Е., Узбеков А.Н. Аномалии гравитационного поля Центрального Казахстана. // Геология и охрана недр. – Алматы. – С. 51–61.
9. Абетов А.Е., Узбеков А.Н., Ахметов А.А. Тепловые поля Центрального Казахстана // Вестник КазНУТУ. – Алматы. 2019. – С. 355–360.

ОРТАЛЫҚ ҚАЗАҚСТАННЫҢ ГЕОФИЗИКАЛЫҚ ӨРІСТЕРІ ЖӘНЕ СЕЙСМИКАЛЫҒЫ

¹⁾А.Е. Абетов, ²⁾А.Н. Узбеков

¹⁾ Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы, Қазақстан

²⁾ Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Мақалада қолданылған материалдардың сипаттамасы келтірілген; аномалдық Жердің геомагниттік, гравитациялық, жылулық өрістерінің көрсетуі үшін аппараттық және әдістерін мәселелерді ұсынады және алынған деректердің түрлі түсіндіру нәтижелері, магнит өрістері байланыстырушы қалыпты Жердің геомагниттік, гравитациялық, жылулық өрісі, есепке жекелеген бөліктерін шашыраңқы байқалады қарайды. аномалдық магнит өрісінің бөлу негізгі заңдылықтарын, сондай-ақ Орталық Қазақстанның ішінде (ΔT_a) саналады, жекелеген аймақтарда, ірі геологиялық құрылымдар, аномалдық кен және ауытқулар кейбір кросс магнит өрісінің сипаттағы мәселелерін шешеді. Аномалдық геомагниттік, гравитациялық, жылулық өрістерінің арасындағы корреляция және Орталық Қазақстан аумағында сейсмикалық белсенділікті анықтау үшін зерттеу нәтижелерін талдады.

Түйін сөздер: аномалды геомагнитті өріс, карта жасау әдістемесі, гравитациялық өріс, жылу өрісі, корреляциялық байланыстар, Орталық Қазақстанның сейсмикалығы.

GRAVITATIONAL FIELDS AND EARTHQUAKES IN CENTRAL KAZAKHSTAN

¹⁾A.E. Abetov, ²⁾A.N. Uzbekov

¹⁾ Kazakh National Technical University named after Satpayev, Almaty, Kazakhstan

²⁾ Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan

The article gave a characteristic of used materials; outline of issues of hardware support and methods for mapping the anomalous geomagnetic, gravitational, geothermal fields of various and the interpretation results from the data obtained, the research of linking the observed magnetic fields to separate isolated areas, registered the normal of magnetic field of the Earth. The main regularities of the distribution of the anomalous geomagnetic field (ΔT_a) within the Central Kazakhstan, issues of nature of anomalous of the geomagnetic, gravitational, thermal fields in some regions, some large geological structures, of anomalous fields and anomalies. The results of investigations on revealing correlations between anomalous geomagnetic, gravitational, thermal fields and seismicity in the territory of Central Kazakhstan are analyzed.

Keywords: abnormal geomagnetic field, map drawing approaches, gravity field, thermal field, correlation relationships, seismicity of Central Kazakhstan.

УДК 621.039

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УСТАНОВКИ ЖАРОПРОЧНОГО ЗАЩИТНОГО КОЖУХА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВНУТРИРЕАКТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Кожабаяев З.Б., Иркимбеков Р.А.

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

Статья посвящена повышению безопасности экспериментов, проводимых на КИР ИГР. Представлены результаты расчетов нейтронно-физических параметров экспериментальных устройств с жаропрочным кожухом. Использование кожуха предполагается для дополнительной защиты активной зоны реактора ИГР от возможного воздействия расплава материалов экспериментального устройства. В качестве материала защитного кожуха рассматривались вольфрам, тантал и углепластик. Применение защитного кожуха оценивалось по следующим параметрам: влияние на относительную мощность экспериментального устройства, влияние на распределение мощности в экспериментальном устройстве, температуры плавления и радиационный разогрев материала кожуха.

Ключевые слова: реактор ИГР, экспериментальное устройство, жаропрочный материал, защитный кожух, вольфрам, тантал, углепластик, температура плавления.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире ежегодно проводятся исследования, направленные на исключение аварийных ситуаций во время проведения экспериментов в реакторах. Исследования в рамках данной темы направлены на поиск эффективных способов предотвращения аварийных ситуаций или сведения их к минимуму.

Эксперименты с различными видами устройств, проводимые на реакторе ИГР, предполагают плавление твэлов при температуре 3200 К с образованием бассейна расплава топлива и стали в полости чехла ТВС. Для предотвращения аварийных случаев выхода расплава топлива из полости чехла ТВС и повреждения активной зоны реактора предполагается использование жаропрочного кожуха. Данный кожух обеспечит дополнительную защиту реактора и наружного корпуса экспериментального устройства (ЭУ) в условиях контактной термической нагрузки со стороны расплава топлива. Учитывая высокую стоимость жаропрочных материалов, необходимо наиболее оптимальное использование материалов чехла с точки зрения экономии средств. Замена поврежденных частей кожуха не представляется возможным в случае цельной конструкции чехла, поэтому предполагается использование составной конструкции кожуха. Количество используемых частей кожуха для проведения эксперимента подбирается в зависимости от размеров чехла ТВС и его высотного расположения относительно центра активной зоны (ЦАЗ) реактора ИГР. Также применение защитной оболочки в виде ампульного устройства увеличивает физический вес экспериментального устройства и ухудшает нейтронно-физические характеристики, что нецелесообразно с точки зрения исследовательских задач.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве жаропрочного материала для защитного кожуха были подобраны следующие материалы с высокой температурой плавления:

- вольфрам с температурой плавления 3695 К;

- тантал с температурой плавления 3290 К;
- углепластик с температурой плавления от 1800 до 3000 К.

Для сравнения использовались 2 модели ЭУ с разными видами материалов кожуха, представленные на рисунке 1 и расположенные в центральном экспериментальном канале (ЦЭК) реактора ИГР. Устройство № 1 (рисунок 1-а) имеет двухрядную компоновку, состоящую из 46 твэлов в чехле ТВС. Центр топливного столба смещен на 500 мм выше уровня ЦАЗ реактора ИГР.

В устройстве № 2 (рисунок 1-б) используется однорядная компоновка, состоящая из 24 твэлов. Центр топливного столба находится на уровне ЦАЗ реактора ИГР.

Основные характеристики твэлов для обоих ЭУ показаны в таблице 1.

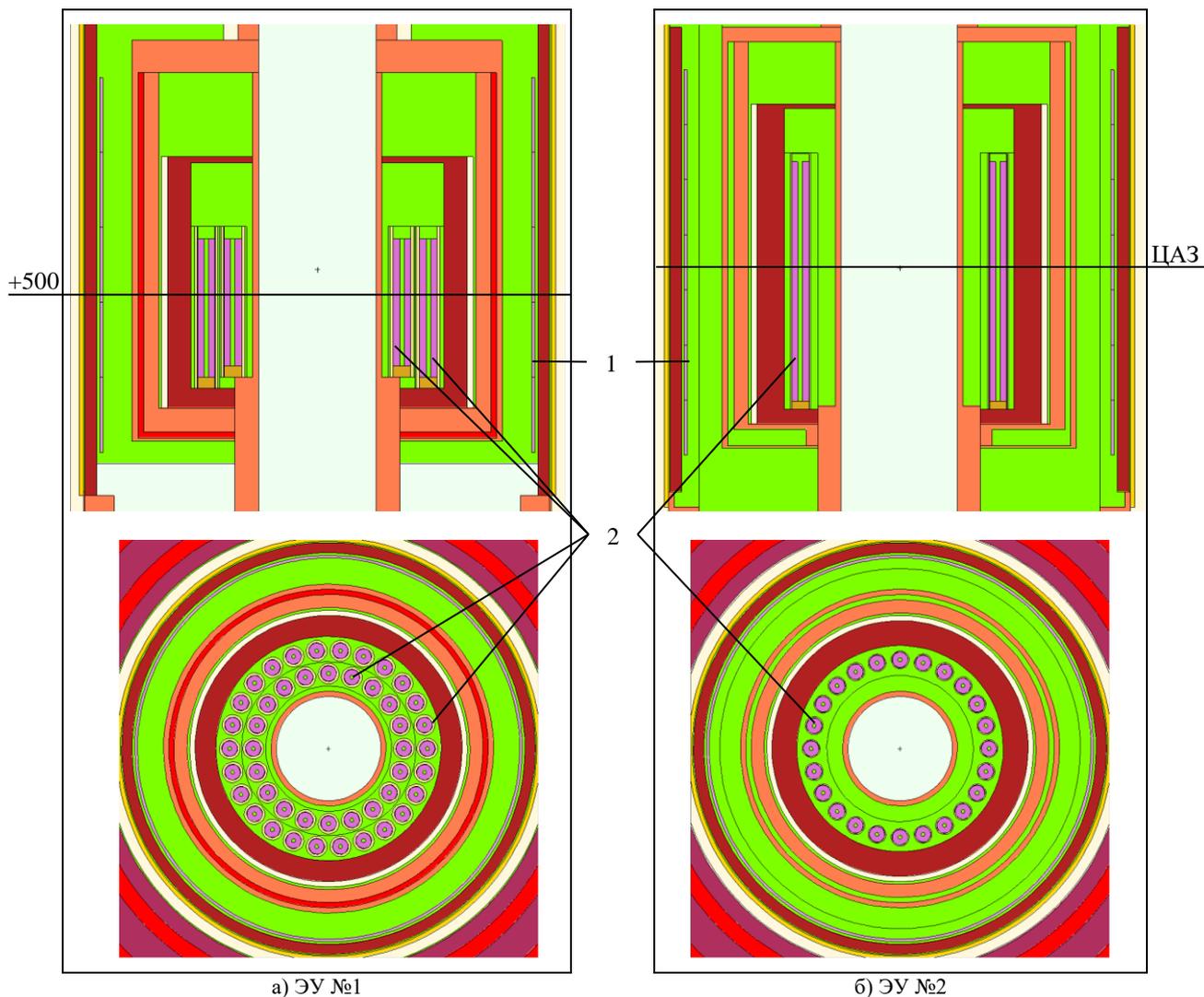
МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ

При проведении расчетов использовалась нейтронно-физическая модель реактора ИГР [1]. Расчеты выполнены с использованием расчетного кода MCNP5 [2]. Расчетная модель реактора полностью соответствует конструкции и учитывает неравномерность распределения концентрации урана в объеме активной зоны. Состояние реактора, близкое к критическому, достигается соответствующим положением регулирующих стержней. Отметка «0» соответствует нижнему торцу неподвижной зоны реактора [3]. Моделирование экспериментального устройства осуществлялось с соблюдением основных размерно-материальных характеристик [4].

В процессе проведения расчетов рассмотрены следующие конфигурации расчетных моделей:

- исходная конфигурация без использования защитного кожуха с температурой активной зоны реактора ИГР равной 294 К и 700 К для ЭУ;
- конфигурация ЭУ с добавлением вольфрамового защитного кожуха;
- конфигурация ЭУ с добавлением танталового защитного кожуха;

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УСТАНОВКИ ЖАРОПРОЧНОГО ЗАЩИТНОГО КОЖУХА
ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВНУТРИРЕАКТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**



а) ЭУ №1

б) ЭУ №2

1 – жаропрочный защитный кожух; 2 – твэлы экспериментальных устройств

Рисунок 1. Расчетные модели ЭУ

Таблица 1. Основные характеристики ЭУ

Наименование параметра	Значение	
	ЭУ №1	ЭУ №2
Топливо	диоксид урана	
Содержание ²³⁵ U в активной части, %	17	
Содержание ²³⁵ U в бланкетной части, %	0,27	
Плотность в активной части, кг/м ³	10300	9300
Плотность в бланкетной части, кг/м ³	10800	10300
Наружный диаметр топливной таблетки, мм	5,9	
Внутренний диаметр топливной таблетки, мм	1,5	
Высота топливного столба, мм	195/200	450
Высота активной части топливного столба, мм	/175/185	435
Высота бланкетной части топливного столба, мм	15/15	15
Материал оболочки	12X18N10T	X16N15M3Б
Наружный диаметр оболочки, мм	6,9	
Внутренний диаметр оболочки, мм	6,1	
Масса топливных таблеток ТВС, кг	2,702	2,850
Масса активной части топливных столбов, кг	2,479	2,750
Масса бланкетной части топливных столбов, кг	0,223	0,100

– конфигурация ЭУ с добавлением углепластикового защитного кожуха.

Расчет высотного распределения энерговыделения в топливе ТВС проведен с разбиением на слои по 10 мм. Отношение удельного энерговыделения в топливе к энерговыделению в реакторе вычислено по формуле [5]:

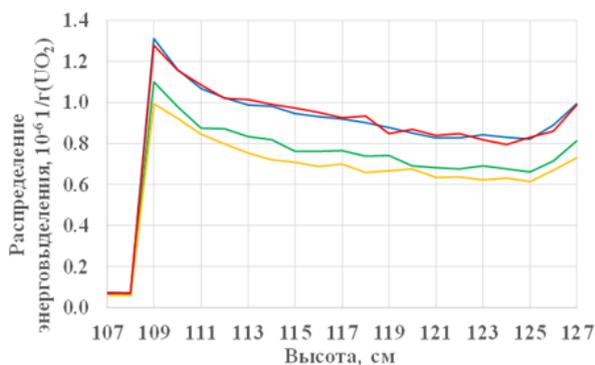
$$k = \frac{q}{Q} \cdot \frac{1}{m},$$

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

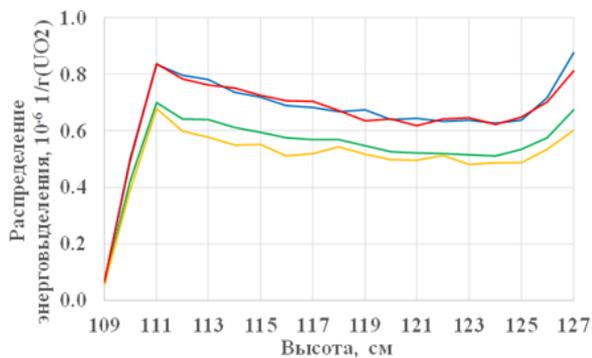
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В результате проведенных нейтронно-физических расчетов определено отношение удельного энерговыделения в топливе модельной ТВС к энерговыделению в реакторе.

На рисунке 2 представлены диаграммы изменения отношения энерговыделения в топливе чехла ТВС ЭУ № 1 к энерговыделению в реакторе ИГР по высоте топливного столба для наружного и внутреннего рядов твэлов. Как видно из диаграммы, наиболее подходящим материалом, с точки зрения сохранения удельной мощности в экспериментальном устройстве, является углепластик, так как падение удельной мощности в топливе ЭУ составило примерно 7%. При использовании вольфрама это значение составило 23%, а при использовании тантала 31%.



а) внешний ряд

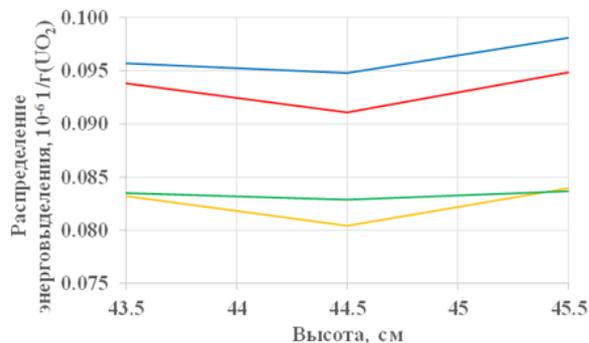


б) внутренний ряд

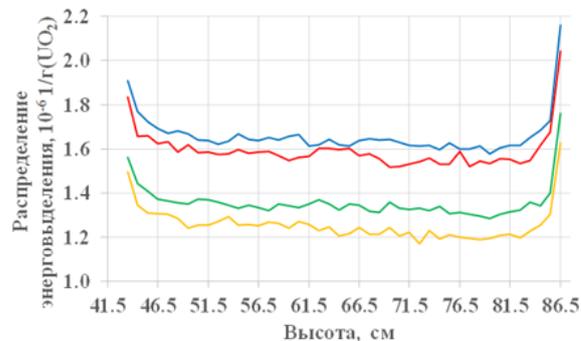
— без кожуха — вольфрам — тантал — углепластик

Рисунок 2. Диаграмма распределения энерговыделения в чехле ТВС ЭУ №1

На рисунке 3 представлены распределения энерговыделения для бланкетной и активной частей чехла ТВС ЭУ №2. В данном случае падение удельной мощности при использовании углепластика составило 8%, вольфрама 20% и тантала 28%.



а) бланкетная часть



б) активная часть

— без кожуха — вольфрам — тантал — углепластик

Рисунок 3. Диаграмма распределения энерговыделения в чехле ТВС ЭУ №2

Средние значения полученных отношений удельного энерговыделения в топливе чехла ТВС к энерговыделению в ИГР для обеих ЭУ показаны в таблицах 2, 3. В таблице 4 представлены отношения удельного энерговыделения защитного кожуха к энерговыделению в реакторе для обеих ЭУ.

Таблица 2. Среднее значение отношения удельного энерговыделения в топливе чехла ТВС ЭУ №1 к энерговыделению в реакторе ИГР

Наименование	Отношение удельного энерговыделения в топливе к энерговыделению в реакторе, $\times 10^{-6} \text{ 1/г} \pm 0,001$			
	без защитного кожуха	вольфрам	тантал	углепластик
Внешний ряд	0,8627	0,7125	0,6562	0,8646
Внутренний ряд	0,6611	0,5423	0,5046	0,6564

Для сравнения используемых моделей на высоте от 99 до 104 см относительно нижнего торца неподвижной зоны реактора рассчитано отношение удельного энерговыделения в кожухе ЭУ к энерговыделению в ИГР и представлено в таблице 5.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УСТАНОВКИ ЖАРОПРОЧНОГО ЗАЩИТНОГО КОЖУХА
ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВНУТРИРЕАКТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Таблица 3. Среднее значение отношения удельного энерговыделения в топливе чехла ТВС ЭУ №2 к энерговыделению в реакторе ИГР

Наименование	Отношение удельного энерговыделения в топливе к энерговыделению в реакторе, $\times 10^{-6} 1/\text{г} \pm 0,001$			
	без защитного кожуха	вольфрам	тантал	углепластик
Бланкетная часть	0,0962	0,0833	0,0825	0,0932
Активная часть	1,6595	1,3563	1,2561	1,5922

Таблица 4. Отношение удельного энерговыделения в защитном кожухе ЭУ к энерговыделению в реакторе ИГР

Наименование	Отношение удельного энерговыделения в кожухе к энерговыделению в реакторе, $\times 10^{-7} 1/\text{г} \pm 0,001$		
	вольфрам	тантал	углепластик
ЭУ №1	0,3409	0,3979	0,1722
ЭУ №2	0,3171	0,3730	0,1611

Таблица 5. Отношение удельного энерговыделения отдельного отрезка защитного кожуха ЭУ к энерговыделению в реакторе ИГР

Высота, см	Отношение удельного энерговыделения в кожухе к энерговыделению в реакторе, $\times 10^{-7} 1/\text{г} \pm 0,001$					
	вольфрам		тантал		углепластик	
99	0,358	0,347	0,410	0,415	0,178	0,171
100	0,353	0,349	0,401	0,410	0,171	0,191
101	0,327	0,338	0,407	0,412	0,171	0,181
102	0,328	0,371	0,404	0,403	0,168	0,171
103	0,316	0,340	0,363	0,408	0,174	0,174
104	0,340	0,369	0,377	0,417	0,176	0,169

По полученным данным отношения энерговыделения в адиабатическом приближении рассчитаны значения температуры материалов кожуха ЭУ в предположении, что интегральная мощность ИГР со-

ЛИТЕРАТУРА

1. Компьютерная модель реактора ИГР для стационарных нейтронно-физических расчетов: а. с. № 2738 от 27.12.16 Республика Казахстан / А.Д. Вурим, В.М. Котов, Р.А. Иркимбеков, Л.К. Жагипарова, А.А. Байгожина.
2. MCNP-5.1.40 Monte-Carlo N-Particle Transport Code; Los Alamos National Laboratory; Los Alamos, New Mexico. – April 24, 2003.
3. Расчетное исследование нейтронно-физических характеристик экспериментального устройства / Л.К. Жагипарова, В.М. Котов, // журнал «Вестник» НЯЦ РК, Вып. 3 (75), сентябрь 2018 г.
4. Энерговыделение в модельной ТВС при тепловых испытаниях в импульсной реакторной установке: дис. канд. физ-мат. наук.: 01.04.14 / Р. А. Иркимбеков // НИ ТПУ. – Томск, 2016, – 129 с.
5. Определение распределения энерговыделения в канале ID3 реактора ИГР / Л.К. Жагипарова, Р.А. Иркимбеков // Актуальные вопросы мирного использования атомной энергии: доклады международной конференции-конкурса молодых ученых и специалистов. Алматы, 06-08 июня 2012 г. – Алматы, 2012. – С. 179–189.

ставила 5200 МДж:

- при использовании вольфрама в ЭУ №1 до 1700 К, в ЭУ №2 до 2000 К;
- при использовании тантала в ЭУ №1 до 1704 К, в ЭУ №2 до 2091 К;
- при использовании углепластика в ЭУ №1 до 427 К, в ЭУ №2 до 481 К.

Выводы

Для защиты наружного корпуса ЭУ и кладки реактора ИГР от воздействия расплавов, образующихся при возможном возникновении аварийных ситуаций, была предложена установка дополнительного кожуха.

На основании проведенных нейтронно-физических расчетов по исследованию влияния используемого материала для кожуха на характеристики экспериментального устройства следует:

1. При применении вольфрама снижается мощность испытываемого устройства, но из-за высокой температуры плавления, равной 3695 К, вольфрам выдерживает большую термическую нагрузку относительно других приведенных материалов кожуха. Примечательно, что это значительно превышает температуру расплава диоксида урана (3200 К). Кроме этого, вольфрам подвержен радиационному разогреву и поэтому не может быть использован в контакте со стальными материалами.

2. В отличие от вольфрама, тантал имеет менее высокую температуру плавления (3290 К), но выбран из-за его устойчивости к различным типам химических воздействий. Тантал произвел самое негативное влияние на мощность ЭУ.

3. Использование углепластика в качестве защитного кожуха незначительно уменьшает мощность ЭУ. Однако углепластик имеет температуру плавления от 1800 до 3000 К в зависимости от своего состава и технологии изготовления, а при высоком градиенте температуры становится хрупким.

**RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF INSTALLING A HEAT-RESISTANT PROTECTIVE SHELL
AGAINST THE EXPOSURE OF MELTS DURING IN-REACTOR EXPERIMENTS**

Z.B. Kozhabayev, R.A. Irkimbekov

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

The article is devoted to improving the safety of experiments carried out at the IGR reactor. The results of calculations of the neutron-physical parameters of experimental devices with a heat-resistant jacket are presented. The use of the casing is intended for additional protection of the IGR reactor core from the possible impact of the melt of the materials of the experimental device. Tungsten, tantalum and carbon fiber reinforced plastic were considered as the material of the protective cover. The use of a protective casing was evaluated according to the following parameters: the effect on the relative power of the experimental device, the effect on the power distribution in the experimental device, the melting temperature and radiation heating of the casing material.

Keywords: IGR reactor, experimental device, heat-resistant, protective casing, tungsten, tantalum, carbon fiber, melting point.

**РЕАКТОРЛЫҚ ТӘЖІРИБЕ ЖАСАҒАНДА ЕРТІПТЕРДІҢ АШУЫНА ҚАРСЫ ЖЫЛЫҚТЫҚ
ТӨЗІМДІ ҚОРҒАУШЫ ҚАПТАМА ОРНАТУ МҮМКІНДІГІН ЗЕРТТЕУ**

З.Б. Кожабаяев, Р.А. Иркимбеков

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

Мақала ИГР реакторында жүргізілген эксперименттердің қауіпсіздігін арттыруға арналған. Тәжірибелік құрылғылардың ыстыққа төзімді қаптама бар нейтронды-физикалық параметрлерін есептеу нәтижелері келтірілген. Қаптаманы пайдалану ИГР реакторының өзегін эксперименттік құрылғы материалдарының балқымасының ықтимал әсерінен қорғауға арналған. Вольфрам, тантал және көміртекті талшықтан жасалған арматураланған пластмасса қорғаныс қабаты үшін материалдар ретінде қарастырылды. Қорғаныс қаптамасын пайдалану келесі параметрлер бойынша бағаланды: эксперименттік құрылғының салыстырмалы қуатына әсері, эксперименттік құрылғыдағы қуаттың таралуына, балқу температурасына және корпус материалының радиациялық қызуына.

Түйінді сөздер: ИГР реакторы, тәжірибелік құрылғы, ыстыққа төзімді, қорғаныс қаптама, вольфрам, тантал, көміртекті талшық, балқу температурасы.

СПИСОК АВТОРОВ

- Абасов Ф.П., 5
Абдуллаев Х.Ш., 5
Абетов А.Е., 119
Абилев М.Б., 35
Абуова А.У., 13, 24
Абуова Ф.У., 13, 24
Айдарханов А.О., 29
Акаев А.С., 47, 88
Ақболатов Е.Ж., 99
Бакланов В.В., 77
Бакланова Ю.Ю., 69
Бекмулдин М.К., 47
Бияхметова Д.Б., 29
Богомолова И.Н., 99
Букина О.С., 69
Градобоев А.В., 29, 35
Гречаник АД., 69
Давыденко Д.И., 53
Даулетханов Е.Д., 92
Ермаков В.А., 8
Жағыпар Н., 13
Жаканбаев Е.А., 113
Жанболатов О.М., 82
Жанболатова Ғ.Қ., 77
Жилкашинова Ас.М., 35
Жилкашинова Ал.М., 35
Ильиных С.А., 8
Инербаев Т.М., 13, 24
Иркимбеков Р.А., 82, 127
Исламов Р.С., 8
Каптагай Г.А., 24
Кенжина Л.Б., 29
Керімше А.С., 113
Кожабаяев З.Б., 127
Кожаметов Е.А., 69, 92
Коровиков А.Г., 53, 99
Котов В.М., 61
Кудранова А.Б., 8
Кукушкин И.М., 69
Ларионова Н.В., 42
Лещенко Н.А., 42
Ляхова О.Н., 18
Мамедов Б.А., 5
Мамырбаев А.Қ., 113
Мамырбаева А.Н., 29
Мартынченко Е.А., 88
Марченко О.О., 18
Медетбеков Б.С., 105
Мерәлі Н.А., 24
Меркель А.И., 42
Миниязов А.Ж., 77
Мухамедов Н.Е., 61, 82
Наджафов Б.А., 5
Наурызбаев Р.Ж., 8
Оракова М.С., 113
Попов Ю.А., 105
Поспелов В.А., 53
Прозорова И.В., 105
Сапатаев Е.Е., 92
Сарсенбаева К.Б., 113
Сатанова Б., 13
Скаков М.К., 29, 35
Соколов И.А., 77
Солтанбек Н., 24
Сулейменов Н.А., 61
Сысалетин А.В., 8
Сысоева Е.С., 42
Тимонова Л.В., 18
Толеубеков К.О., 47
Туленбергенев Т.Р., 77
Тулешев Ю.Ж., 113
Узбеков А.Н., 119
Хасенова С.М., 88
Шевченко А.М., 99
Шевченко Ю.С., 42

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 подрисуночных 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 растровых (*.tif, *.gif, *.png, *.jpg с разрешением 600 dpi) или векторных (*.svg, *.wmf, *.emf) форматах.
- 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. Бейбіт атом, 2Б
<https://www.nnc.kz/publications/bulletin.html>

© Редакция журнала «Вестник НЯЦ РК», 2020

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. Бейбіт атом, 2Б

